



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ISSN: 2618-8201

**№ 4(12)
2018**

Вестник Современных Технологий

Сборник научных трудов

В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки
и оборудования в машиностроении» (10 – 14 сентября 2018 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-08-20074)

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

№ 4 (12)
2018

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в
машиностроении» (10 – 14 сентября 2018 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-08-20074)*

Севастополь 2018

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., проф. – ХАРЧЕНКО А.О.

Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

Редакционная коллегия

АБДУЛГАЗИС У.А.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
БЕРЕНГАРТЕН М. Г.	к. х. н., проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
БУРНАШЕВ М.А.	д. т. н., доц. (г. Орел)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., доц. (г. Белгород)
КОЗЛОВ А.М.	д. т. н., проф. (г. Липецк)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, Украина)
НОСЕНКО В.А.	д. т. н., проф. (г. Волжский)
ОБЖЕРИН Ю.Е.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
НОВОСЕЛОВ Ю.К.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.,	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФАЛАЛЕЕВ А.П.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ФЕДОНИН О.Н.	д. т. н., проф. (г. Брянск)
ЯКУБОВ Ф.Я.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ЯРОШЕНКО А.А.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Богущий В.Б., Шрон Л.Б. Методика оценки надежности синтезированного варианта модуля для механической обработки деталей	4
Братан С.М., Харченко А.О., Рошупкин С.И., Владеецкая Е.А. Построение динамических звеньев, характеризующих статистические свойства шлифовального круга и заготовки при плоском шлифовании	13
Гусев В.В., Лазарев Д.С., Моисеев Д.А. Выбор параметров управления режущей способностью алмазного шлифовального круга свободным абразивом ...	20
Ерёменко Д.О., Покинтелица Н.И. Технология получения дистиллированной воды с использованием самоочищения поверхности нагревательных элементов	26
Иконников А.М. Выбор оснастки для операций магнитно-абразивной обработки.....	32
Черепашков А.А., Самойлов П.А. Моделирование и анализ эффективности динамических моделей комплексных автоматизированных систем машиностроительного производства	38
Левченко Е.А., Дейкун Ю.В. Использование механохимического метода обработки сталей на вибрационных станках	44
Липка В.М., Братан С.М., Рапацкий Ю.Л. Повышение надежности резьбонакатных роликов, изготавливаемых методом резьбошлифования	49
Новиков П.А., Крамарь В.А. Диагностика процесса обработки внутренних резьб малого диаметра полученных деформирующе-режущими метчиками	58
Богущий В.В., Братан С.М. Обеспечение продольной волнистости при круглом плоском шлифовании	64
Сидоров Д.Е. Моделирование формообразования отверстий при сверлении полимерных композиционных материалов.....	69

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация; ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября, д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

CONTENTS

Chief Editor

D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.

Associate Editor in Chief

Ph.D., Prof. – KHARCHENKO A.O.

Scientific Editor

D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.

Executive Secretary

Ph.D., Associate Prof. – LEVCHENKO E.A.

Editorial team

ABDULGAZIS U.A.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
BERENGARTEN M.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHEV M.A.	D.Sc., Associate Prof. (Orel)
DUYUN T.A.	D.Sc., Associate Prof. (Belgorod)
KOZLOV A.M.	D.Sc., Prof. (Lipetsk)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NOSENKO V.A.	D.Sc., Prof. (Volzhsky)
OBEZHERIN YU.E.	D.Sc.Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FALALEEV A.P.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAKUBOV F.YA.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

Bogutsky V.B., Shron L.B. Methodology the assessment of the reliability of the synthesized variant of the module for machining parts.....	4
Bratan S.M., Kharchenko A.O., Roshchupkin S.I., Vladetskaya E.A. Modeling of dynamic links which characterize static properties of grinding wheel and workpiece during flat grinding process	13
Gusev V.V., Lazarev D.S., Moiseev D.A. The choice parameters to manage cutting ability of diamond grinding wheel with a free abrasive	20
Eremenko D.O., Pokintelitsa N.I. Distilled water production technology with using surface of heating elements self-cleaning.....	26
Ikonnikov A.M. Selection of accessories for magnetic abrasive treatment operations.....	32
Cherepashkov A.A., Samoilov P.A. Modeling and analysis of the effectiveness of dynamic models of complex automated systems of machine-building production.....	38
Levchenko E.A., Deykun Yu.V. Use of the mechano-chemical method of processing of steels on vibration machines.....	44
Lipka V.M., Bratan S.M., Rapatskiy Ju.L. Improving the reliability of threaded rollers manufactured by threading method.....	49
Novikov P.A., Kramar V.A. Diagnostics of the process of cutting internal screw-threads of small diameter obtained by deforming-cutting taps.....	58
Bogutsky B.V., Bratan S.M. Providing the longitudinal voluntary in round flat grinding	64
Sidorov D.E. Modeling forming of holes at the drilling of polymer composite materials	69

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; FSBEU HE «Bryansk State Technical University», Boulevard 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation

The collection is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass communications. The certificate PI № FS 77 - 64121 of 25.12.2015

УДК 658.512

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СИНТЕЗИРОВАННОГО ВАРИАНТА МОДУЛЯ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

В.Б. Богущкий¹, Л.Б. Шрон¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Частая сменяемость изделий требует пересмотра методов принятия решений при формировании компоновок гибких производственных модулей. Показано, что при анализе параметрических отказов системы следует учитывать воздействие таких факторов, как быстропротекающие процессы, процессы средней скорости и медленно протекающие процессы. Технологическая система гибкого производственного модуля рассматривается как дискретная система, имеющая разные состояния и каждая технологическая подсистема подвергается восстановлению сразу после отказа. Проведенный в работе анализ позволил получить выражения для расчета величин финальных вероятностей, как по отказам функционирования, так и по параметрическим отказам.

Ключевые слова: компоновка гибких производственных модулей, отказ функционирования, параметрический отказ, дискретная система, интенсивность восстановления.

METHODOLOGY THE ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF THE SYNTHESIZED VARIANT OF THE MODULE FOR MACHINING PARTS

V.B. Bogutsky¹, L.B. Shron¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Frequent removability of products requires a revision of the decision-making methods when forming the layouts of flexible production modules. It is shown that the analysis of parametric failures of the system should take into account the impact of such factors as fast processes, medium speed processes and slow processes. The technological system of a flexible production module is viewed as a discrete system having different states and each technological subsystem undergoes recovery immediately after failure. The analysis carried out in the work allowed obtaining expressions for calculating the values of the final probabilities, both for functional failures and for parametric failures.

Keywords: assembly of flexible production modules, failure of functioning, parametric failure, discrete system, recovery intensity.

Введение

Характерным признаком современного производства является его многономенклатурность при росте требований к его производительности. В тоже время, одной из причин недостаточной конкурентоспособности отечественных предприятий является низкий уровень переналаживаемости их оборудования, который не позволяет достаточно быстро реагировать на требования рынка. В условиях современных рыночных отношений значительно повысились требования к качеству выпускаемой продукции и соответственно, изменился характер машинострои-

тельного производства. Если клиента не удовлетворяет качество продукции, она не будет востребована на рынке [1–4]. Частая сменяемость изделий при росте требований к производительности механообрабатывающих модулей требует пересмотра методов принятия решений при формировании компоновок ГПМ [5–7 и др.].

Анализ применяемых методов проектирования компоновок ГПМ [8–11] показал, что на этапе проектирования весьма сложно прогнозировать надежность их работы в условиях многономенклатурного производства. При проектировании компоновок ГПМ, как правило, формируется множество струк-

тур ГПМ с учетом возможности концентрации операций, т. е. применения широкодиапазонного высоконадежного технологического оборудования, применения современных конструкций инструментов, технологической оснастки и загрузочных устройств и последующий выбор рационального варианта. Например, в [12] предложен алгоритм выбора рациональных подсистем и элемен-

тов для обработки определенных групп деталей и показан результат синтеза компоновки ГПМ для обработки шлицевых валов (рис. 1). Однако, полученную компоновку ГПМ следует оценивать не только с точки зрения технологических возможностей и производительности, но и по показателям надежности работы [13–15].

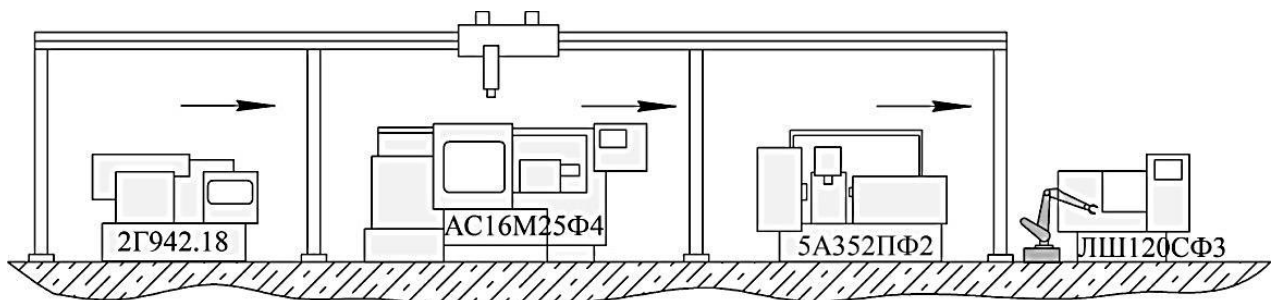


Рис. 1. Синтезированная компоновка ГПМ для обработки шлицевых валов.

Цель статьи – разработка методики оценки финальных вероятностей по отказам функционирования и параметрическим отказам проектируемых механообрабатывающих модулей с учетом стохастических процессов, происходящих в технологической системе.

Изложение основного материала

Каждый элемент технологической системы (синтезированного варианта модуля для механической обработки деталей) может иметь различную интенсивность восстановления μ , также как и различную интенсивность отказов λ , т.е. различную надежность [16 и др.]. Вместе с тем более сложный элемент при одинаковом λ с другим элементом может иметь меньшую величину μ (надежность меньше), или при одинаковом с другим элементом значении μ – большее значение λ . Этот факт необходимо учесть при выборе оценки эффективности ГПМ.

Рассмотрим каждый ГПМ на участке, как дискретную систему, элементы которой отказывают друг от друга независимо и после отказа начальное состояние элемента восстанавливается полностью, а отказы, работа и восстановление одного элемента никак не влияют на надежность других элементов. Моменты отказов каждого элемента

создают независимые процессы восстановления. Предположим, что эти процессы независимы, обозначим через $F_k(t)$ закон распределения времени работы k -го технологического элемента и что этот закон имеет непрерывную плотность $f_k(t)$, а также существует среднее время работы технологического элемента F_k и его дисперсия.

Поскольку элементы в системе ГПМ соединены (в смысле надежности) последовательно, то отказ любого элемента вызывает отказ системы в целом. Возникновение отказов на одном отрезке времени почти не изменяет вероятность возникновения некоторого числа отказов на отрезке времени, не перекрывающемся с первым. Из этого следует, что в потоке отказов технологической системы ГПМ не должно быть последствия. При этом следует учесть, что законы распределения $F_k(t)$ обладают непрерывной плотностью [16 и др.], то есть функция $H(t)$, характеризующая среднее число отказов, непрерывна и поток отказов каждого элемента системы ГПМ является ординарным, т.е. вероятность одновременного появления двух отказов равна нулю.

В теории массового обслуживания [17] показано, что простейшим нестационарным потоком можно считать ординарный поток с непрерывной функцией $H(t)$, в котором от-

существует последствие. Это означает, что вероятность появления n отказов на любом участке (t_1, t_2) можно описать формулой (1) и для любой системы неперекрывающихся интервалов, события, заключающиеся в появлении заданного числа отказов на каждом интервале, независимы.

$$P_n(t_1, t_2) = \frac{[H(t_2) - H(t_1)]^n}{n!} e^{-[H(t_2) - H(t_1)]} \quad (1)$$

Следовательно, при достаточно общих условиях поток отказов технологической системы ГПМ будет, по крайней мере, приближенно, простейшим нестационарным потоком. Из формулы (1) видно, что число отказов на каждом интервале распределено по закону Пуассона (пуассоновский поток с переменным параметром где в качестве переменного параметра используется интенсивность отказов $\lambda(t)$). Тогда выражение для $P_n(t_1, t_2)$ можно записать в следующем виде:

$$P_n(t_1, t_2) = \frac{\left[\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right]^n}{n!} e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt}$$

Согласно [17, 18] если на участке $(t, t+\tau)$ функция $\lambda(t)$ приближенно линейна, то хорошее соответствие для этих вероятностей дает равенство:

$$P_n(t, t+\tau) \approx \frac{[\lambda(t + \tau/2)]^n}{n!} e^{-\lambda(t + \tau/2)\tau}$$

Если же функция $\lambda(t)$ на этом участке приближенно постоянна $\lambda(t) \approx \lambda$, то:

$$P_n(t, t+\tau) \approx \frac{\lambda^n \tau^n}{n!} e^{-\lambda \tau}$$

Так как на участках между соседними отказами $\lambda(t)$ почти не меняется, то среднее время до первого отказа технологического элемента может быть определено по зависимости

$$\bar{T} \approx (\lambda(t))^{-1}$$

Как правило, работа технологической системы ГПМ продолжается столь долго, что все элементы (станок, инструмент, технологическая оснастка, грузозахватное устройство) могут отказывать неоднократно. Так, некоторые виды инструментов в процессе эксплуатации отказывают в среднем

120...140 раз в неделю [19, 20 и др.]. При этих условиях процессы восстановления становятся стационарными и, следовательно, поток отказов системы также устанавливается. Так как интенсивности восстановления для каждого элемента стремятся к пределам

$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu_k(t) (T_k')^{-1}$, то интенсивность отказов си-

стемы имеет предел $\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda = \lambda_0 = \sum_{k=1}^m (T_k')^{-1}$, где

m – число технологических элементов. При этом поток системы становится пуассоновским потоком с постоянным параметром, т.е. простейшим потоком. Для этого потока вероятность появления n отказов на участке времени длительности τ не зависит от положения этого участка и выражается формулой

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda_0 \tau)^n}{n!} e^{-\lambda_0 \tau}$$

В частности, вероятность безотказной работы системы ГПМ в течение времени τ равна:

$$P_0(\tau) = e^{-\lambda \tau}.$$

и, следовательно, среднее время безотказной работы равно:

$$\bar{T} \approx (\lambda(0))^{-1}.$$

Поскольку число отказов, появляющихся в заданном интервале времени имеет пуассоновское распределение, то время между отказами имеет экспоненциальное распределение, т.е. надежность каждого технологического элемента в системе ГПМ подчиняется экспоненциальному закону:

$$F_k(t) = 1 - e^{-\lambda_k t}.$$

Процесс восстановления для каждого элемента будет образовывать простейший поток и, значит, поток восстановления системы ГПМ как сумма простейших потоков также будет потоком простейшим.

Приведенные выше доводы и рассуждения вполне справедливы при рассмотрении эксплуатационной надежности (отказов функционирования) технологической системы ГПМ.

При анализе параметрических отказов (технологической надежности) системы следует учитывать воздействие таких факторов, как износ инструмента, наличие и колебание

величины сил резания (быстропротекающих процессов), тепловые и силовые деформации элементов станка, технологической оснастки, загрузочного устройства (процессы средней скорости), износ направляющих стола, шпиндельных опор, фиксирующих элементов приспособления (медленно протекающие процессы). Как показали исследования [21–23], эти источники погрешности носят случайный характер, а плотности вероятностей составляющих погрешностей имеют гамма – распределение. Однако, начиная с некоторого момента времени t_0 (окончания периода приработки) при определении вероятности безотказной работы (отсутствия параметрических отказов) ГПМ допустимо применение показательного распределения взамен гамма – распределения.

С учетом вышеприведенных доводов рассмотрим технологическую систему ГПМ как дискретную систему (рис. 2), которая может находиться в состояниях $S'_0, S'_1, S'_2, S'_3, S'_4, S'_5$.

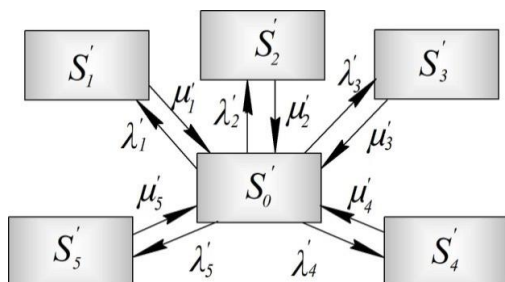


Рис. 2. Размеченный граф состояний технологической системы ГПМ с учетом отказов функционирования.

Состояние S'_0 характеризует нормальное функционирование ГПМ при отсутствии каких-либо отказов, Состояние S'_1 характеризуется выходом из строя инструмента вследствие потока отказов функционирования с интенсивностью λ'_1 . В этом случае

$\lambda'_1 = \left(\bar{T}'_u\right)^{-1}$, где $\bar{T}'_u$ – среднее время между двумя отказами функционирования инструмента, мин. Состояние S'_2 характеризует выход из строя станка из-за потока отказов с интенсивностью λ'_2 . При этом $\lambda'_2 = \left(\bar{T}'_c\right)^{-1}$, где $\bar{T}'_c$ – среднее время между двумя отказа-

ми функционирования станка, мин. В состоянии S'_3 требуется ремонт вышедшей из строя технологической оснастки вследствие потока отказов с интенсивностью λ'_3 . В этом

случае $\lambda'_3 = \left(\bar{T}'_{mo}\right)^{-1}$, где $\bar{T}'_{mo}$ – среднее время между двумя отказами функционирования технологической оснастки, мин. Состояние S'_4 характеризуется выходом из строя загрузочного устройства вследствие потока отказов функционирования с интенсивностью λ'_4 . При этом $\lambda'_4 = \left(\bar{T}'_{zy}\right)^{-1}$, где $\bar{T}'_{zy}$ – среднее

время между двумя отказами функционирования загрузочного устройства, мин. В состоянии S'_5 требуется ремонт вышедшего из строя транспортного устройства вследствие потока отказов с интенсивностью λ'_5 . В этом случае $\lambda'_5 = \left(\bar{T}'_{my}\right)^{-1}$, где $\bar{T}'_{my}$ – среднее время между двумя отказами функционирования транспортного устройства, мин.

Величины $T'_u, T'_c, T'_{mo}, T'_{zy}, T'_{my}$ определяются по формуле:

$$\bar{T}' = \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{m}, \quad (2)$$

где m – число отказов функционирования соответствующего технологического элемента модуля, t_j – интервал между $(j-1)$ и j отказами.

Каждый технологический элемент (подсистема) модуля подвергается восстановлению сразу после отказа. Интенсивность восстановления соответственно для каждого технологического элемента $\mu'_1, \mu'_2, \mu'_3, \mu'_4, \mu'_5$, считая при этом, что время восстановления, являясь случайной величиной, подчиняется закону Пуассона:

$$\mu'_1 = \left(T'_{Bu}\right)^{-1}; \mu'_2 = \left(T'_{Bc}\right)^{-1}; \mu'_3 = \left(T'_{Bmo}\right)^{-1}; \\ \mu'_4 = \left(T'_{Bzy}\right)^{-1}; \mu'_5 = \left(T'_{Bmy}\right)^{-1}.$$

где T'_{Bu} – среднее время восстановления (замены) инструмента, мин; T'_{Bc} – среднее время восстановления (ремонта) элементов

станка, мин; T'_{Bmo} – среднее время восстановления (ремонта) технологической оснастки, мин; T'_{Bzy} – среднее время восстановления (ремонта) загрузочного устройства, мин; T'_{Bmy} – среднее время восстановления (ремонта) транспортного устройства, мин.

Для описания графа состояний технологической системы ГПМ (рис. 1) обозначим: P'_0 – вероятность работы ГПМ, $P'_0 = P(S'_0)$;

$$\begin{cases} P'_0(\lambda'_1 + \lambda'_2 + \lambda'_3 + \lambda'_4 + \lambda'_5) = P'_1\mu'_1 + P'_2\mu'_2 + P'_3\mu'_3 + P'_4\mu'_4 + P'_5\mu'_5; \\ P'_1\mu'_1 = P'_0\lambda'_1 \\ P'_2\mu'_2 = P'_0\lambda'_2 \\ P'_3\mu'_3 = P'_0\lambda'_3 \\ P'_4\mu'_4 = P'_0\lambda'_4 \\ P'_5\mu'_5 = P'_0\lambda'_5 \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений позволяет получить выражения для финальных вероятностей по отказам функционирования $P'_0, P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5$ [24]:

$$\begin{aligned} P'_1 &= P'_0 \lambda'_1 / \mu'_1; \quad P'_2 = P'_0 \lambda'_2 / \mu'_2; \quad P'_3 = P'_0 \lambda'_3 / \mu'_3; \\ P'_4 &= P'_0 \lambda'_4 / \mu'_4; \quad P'_5 = P'_0 \lambda'_5 / \mu'_5. \end{aligned}$$

Технологическая система ГПМ вследствие потока параметрических отказов (рис. 3), возникающих в результате деформация инструмента, погрешностей позиционирования загрузочного устройства, приспособления, биения шпинделя станка, изменения температуры станка и элементов устройства управления теряет работоспособность, не обеспечивая точность обработки и, вследствие этого, может находиться в состояниях $S_0, S_1, S_2, S_{12}, S_3, S_4, S_{34}, S_{13}, S_{23}, S_{123}, S_{14}, S_{24}, S_{124}, S_{134}, S_{234}, S_{1234}$.

Состояние S_0 характеризует нормальную работу всей технологической системы ГПМ при отсутствии параметрических отказов. В состоянии S_1 наблюдаются параметрические

$P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5$ – соответственно вероятности поломки инструмента $P'_1 = P(S'_1)$, станка $P'_2 = P(S'_2)$, технологической оснастки $P'_3 = P(S'_3)$, загрузочного $P'_4 = P(S'_4)$ и транспортного $P'_5 = P(S'_5)$ устройств.

Уравнения для финальных вероятностей $P'_0, P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5$ можно представить в виде системы уравнений:

отказы инструмента вследствие потока отказов инструмента с интенсивностью λ_1 . В этом случае $\lambda_1 = (\bar{T}_u)^{-1}$, где $\bar{T}_u$ – среднее время между двумя параметрическими отказами инструмента, мин. В состоянии S_2 требуется осмотр и подналадка станка вследствие потока его параметрических отказов с интенсивностью λ_2 . При этом $\lambda_2 = (\bar{T}_c)^{-1}$, где $\bar{T}_c$ – среднее время между двумя параметрическими отказами станка, мин. Состояние S_{12} характеризуется одновременным наличием потоков отказов инструмента λ_1 и станка λ_2 . В состоянии S_3 требуется осмотр и подналадка технологической оснастки из-за наличия ее параметрических отказов с интенсивностью λ_3 .

При этом $\lambda_3 = (\bar{T}_{mo})^{-1}$, где $\bar{T}_{mo}$ – среднее время между двумя параметрическими отказами технологической оснастки, мин. Состояние S_4 характеризуется наличием параметрических отказов загрузочного устройства, мин.

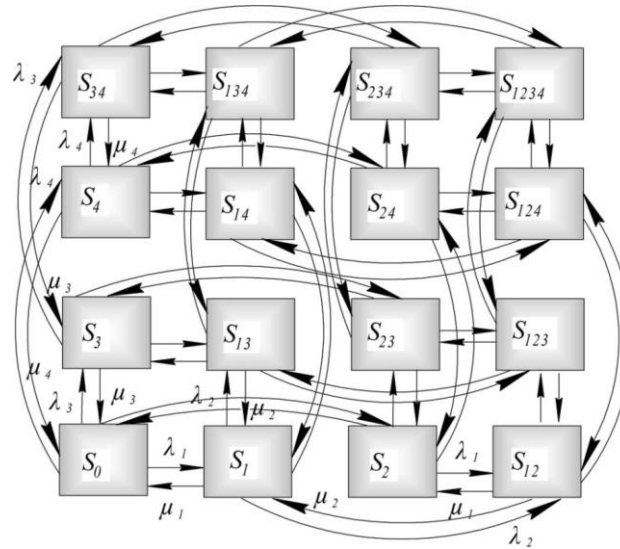


Рис. 3. Размеченный граф состояний технологической системы ГПМ с учетом параметрических отказов.

Состояние S_4 характеризуется наличием параметрических отказов загрузочного устройства, мин. В состоянии S_{34} требуется осмотр и подналадка технологической оснастки и загрузочного устройства вследствие потоков отказов технологической оснастки λ_3 и загрузочного устройства λ_4 . Состояние S_{13} характеризуется одновременным наличием потоков параметрических отказов инструмента λ_1 и технологической оснастки λ_3 . В состоянии S_{23} требуется осмотр и подналадка станка и технологической оснастки, вызванных соответственно потоками отказов λ_2 и λ_3 . Состояние S_{123} характеризуется одновременным наличием потоков параметрических отказов инструмента λ_1 , станка λ_2 и технологической оснастки λ_3 . В состоянии S_{14} требуется осмотр и подналадка инструмента и загрузочного устройства вследствие потоков параметрических отказов λ_1 и λ_4 . Состояние S_{24} характеризуется одновременным наличием параметрических отказов станка λ_2 и загрузочного устройства λ_4 . В состоянии S_{124} требуется осмотр и подналадка инструмента, станка и загрузочного устройства, вызванные соответственно потоками отказов λ_1 , λ_2 и λ_4 . Состояние S_{134} характеризуется наличием одновременных параметрических потоков отказов инструмента λ_1 , технологической оснастки λ_3 и загрузочного устройства λ_4 . В состоянии S_{234} требуется осмотр и подналадка станка, технологической оснастки и за-

грузочного устройства из-за потоков параметрических отказов λ_2 , λ_3 и λ_4 . Состояние S_{1234} характеризуется одновременным наличием потоков параметрических отказов инструмента λ_1 , станка λ_2 , приспособления λ_3 и загрузочного устройства λ_4 .

Величины $\bar{T}_u$, $\bar{T}_c$, $\bar{T}_{mo}$, $\bar{T}_{zy}$, $\bar{T}_{my}$ определяются по общей формуле:

$$\bar{T}' = \sum_{j=1}^k \frac{t_j}{k},$$

где k – число параметрических отказов соответствующей подсистемы модуля; t_i – интервал между $(j-1)$ -м и j -м отказами.

Каждая подсистема ГПМ сразу после параметрического отказа подвергается восстановлению. Для каждой подсистемы (элемента) интенсивность восстановления соответственно $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$. При этом:

$$\mu_1 = (\bar{T}_{Bu})^{-1}; \mu_2 = (\bar{T}_{Bc})^{-1}; \mu_3 = (\bar{T}_{Bmo})^{-1}; \\ \mu_4 = (\bar{T}_{Bzy})^{-1},$$

где $\bar{T}_{Bu}$ – среднее время восстановления (осмотра и подналадки) инструмента, мин; $\bar{T}_{Bc}$ – среднее время осмотра и подналадки станка, мин; $\bar{T}_{Bmo}$ – среднее время осмотра и подналадки технологической оснастки, мин; $\bar{T}_{Bzy}$ – среднее время осмотра и подналадки загрузочного устройства, мин.

Для описания графа состояний технологической системы ГПМ с учетом параметрических отказов (рисунок 2) обозначим: P_0 –

вероятность работы модуля при отсутствии параметрических отказов, $P_0 = P(S_0)$; P_1, P_2, P_{12} – соответственно вероятность параметрических отказов инструмента, $P_1 = P(S_1)$; станка $P_2 = P(S_2)$; инструмента и станка одновременно $P_{12} = P(S_{12})$; P_3, P_4, P_{34} – соответственно вероятности параметрических отказов технологической оснастки, $P_3 = P(S_3)$; загрузочного устройства, $P_4 = P(S_4)$; технологической оснастки и загрузочного устройства одновременно, $P_{34} = P(S_{34})$; P_{13}, P_{23}, P_{123} – вероятности параметрических отказов соответственно инструмента и технологической оснастки, $P_{13} = P(S_{13})$; станка и приспособления, $P_{23} = P(S_{23})$; инструмента, станка и технологической оснастки, $P_{123} = P(S_{123})$; P_{12}, P_{24}, P_{124} – вероятности параметрических отказов ин-

струмента и загрузочного устройства, $P_{14} = P(S_{14})$; станка и загрузочного устройства, $P_{24} = P(S_{24})$; станка, инструмента и загрузочного устройства, $P_{124} = P(S_{124})$; $P_{134}, P_{234}, P_{1234}$ – вероятности параметрических отказов инструмента, технологической оснастки и загрузочного устройства, $P_{134} = P(S_{134})$; станка, приспособления и загрузочного устройства, $P_{234} = P(S_{234})$; одновременно всех технологических элементов инструмента, станка, приспособления и загрузочного устройства, $P_{1234} = P(S_{1234})$.

Уравнения финальных вероятностей $P_0, P_1, P_2, P_{12}, P_3, P_4, P_{34}, P_{13}, P_{23}, P_{123}, P_{14}, P_{24}, P_{124}, P_{134}, P_{234}, P_{1234}$ можно представить в виде системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) = P_1\mu_1 + P_2\mu_2 + P_3\mu_3 + P_4\mu_4 \\ P_1(\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) = P_0\lambda_1 + P_{13}\mu_3 + P_{12}\mu_2 + P_{14}\mu_4 \\ P_2(\mu_2 + \lambda_3 + \lambda_2) = P_0\lambda_2 + P_{12}\mu_1 + P_{23}\mu_2 \\ P_3(\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) = P_0\lambda_3 + P_{13}\mu_1 + P_{34}\mu_2 + P_{23}\mu_4 \\ P_4(\mu_4 + \lambda_4 + \lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_4) = P_0\lambda_4 + P_{14}\mu_1 + P_{34}\mu_4 + P_{23}\mu_4 \\ P_{12}(\mu_2 + \lambda_2 + \lambda_1 + \lambda_1) = P_1\lambda_2 + P_2\mu_1 + P_{124}\mu_1 + P_{123}\mu_1 \\ P_{13}(\mu_3 + \lambda_2 + \lambda_1) = P_1\lambda_2 + P_3\mu_3 + P_{123}\mu_1 \\ P_{34}(\mu_3 + \lambda_4 + \lambda_3 + \lambda_4) = P_4\lambda_3 + P_3\mu_4 + P_{134}\mu_3 + P_{234}\mu_4 \\ P_{23}(\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_1 + \lambda_4) = P_2\lambda_1 + P_3\mu_3 + P_{123}\mu_1 + P_{234}\mu_4 \\ P_{123}(\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4) = P_{13}\lambda_1 + P_{12}\mu_1 + P_{23}\mu_3 + P_{1234}\mu_4 \\ P_{24}(\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_1) = P_2\lambda_1 + P_{124}\mu_1 + P_{4}\mu_{234} \\ P_{124}(\mu_1 + \lambda_4 + \lambda_1 + \lambda_1) = P_{14}\lambda_4 + P_{12}\mu_1 + P_{1234}\mu_1 \\ P_{134}(\mu_4 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_1) = P_{34}\lambda_3 + P_{14}\mu_4 + P_{1234}\mu_1 \\ P_{234}(\mu_4 + \lambda_4 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_1) = P_{34}\lambda_4 + P_{23}\mu_3 + P_{24}\mu_4 + P_{1234}\mu_1 \\ P_{1234}(\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_1) = P_{123}\lambda_1 + P_{234}\mu_4 + P_{134}\mu_1 \end{array} \right.$$

Решение данной системы уравнений, например, методами Крамера или Гаусса, позволяет получить выражения для расчета величин финальных вероятностей по параметрическим отказам $P_0, P_1, P_2, P_{12}, P_3, P_4, P_{34}, P_{13}, P_{23}, P_{123}, P_{14}, P_{24}, P_{124}, P_{134}, P_{234}, P_{1234}$.

Выводы

Проведенный анализ позволил получить выражения для расчета величин финальных вероятностей, как по отказам функционирования, так и по параметрическим отказам с учетом стохастических процессов, происходящих в технологической

системе каждого ГПМ в реальных условиях функционирования. Для более полной оценки анализируемых вариантов компоновок ГПМ необходимо выполнить оценку уровня переналаживаемости проектируемых механообрабатывающих модулей.

Список литературы

1. Новые производственные технологии: публичный аналитический доклад. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. – 272 с.
2. Raluca Nicolae. Flexibility and efficiency analysis of a flexible manufacturing system/ Raluca Nicolae, Anisor Nedelcu// Review of the Air Force Academy No 1 (28) 2015. – pp.155-158.
3. Сергеев А. И. Научное производство: стратегия оптимизации затрат эксплуатанта / В.Б. Кузнецова, А.И. Сердюк, А.И. Сергеев, Д.В. Кондусов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 4. – С. 90-94.
4. ENG Flexible Manufacturing System for Mass Customization Manufacturing, Guixiu Qiao, Roberto Lu, and Charles McLean. – Режим доступа: <http://scg.mit.edu/images/MCPC%202003/site/4-MCP%20Manufacturing%20and%20Logistics/9-Qiao.pdf>.
5. M. Carmen Ruiz. Improving performance in flexible manufacturing systems/M. Carmen Ruiz [at all] //The Journal of Logic and Algebraic Programming, 78 (2009). – pp.260-273.
6. Епифанов В.В. Разработка технологических структур металлорежущего оборудования с программным управлением для групповой обработки сложных деталей вращения. Дисс. докт. техн. наук. Ульяновск, 2005. – 323 с.
7. Hermaste A. Design principles of flexible manufacturing systems / A. Hermaste, J. Riives, K. Sonk, M. Sarkans // 9th International DAAAM Baltic Conference «INDUSTRIAL ENGINEERING» 24-26 April 2014, Tallinn, Estonia. – PP.92-96.
8. Пухов А.С. Синтез решений при поисковом проектировании автоматизированных систем: Монография. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2009. – 154 с.
9. Tiberiu S. Letia. Analysis and Synthesis of the Flexible Manufacturing System Potential Behaviors/ Tiberiu S. Letia, Adina Astilean, Mihai Hulea//Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Bucharest, Romania, May 23-25, 2012. – pp.248-253.
10. Design for Manufacturing, Assembly, and Reliability. U.S. Department of energy. Режим доступа: URL: https://build4scale.llnl.gov/docs/modules/Module_3C.pdf
11. Koren Y. Reconfigurable Manufacturing Systems / Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, [at all] // Annals of the CIRP Vol. 48/2/1999. - pp. 527-540. – Режим доступа: URL: http://www-personal.umich.edu/~ykoren/uploads/Reconfigurable_manufacturing.
12. Богуцкий В.Б., Шрон Л.Б., Гордеева Э.С. Синтез гибких механообрабатывающих модулей для условий ремонтного производства/ В.Б. Богуцкий, Л.Б. Шрон, Э.С. Гордеева //Theoretical & Applied Science. 2017. №11 (55). С. 101-110.
13. Seongwoo Woo. Reliability Design of Mechanical Systems. A Guide for Mechanical and Civil Engineers DOI 10.1007/978-3-319-50829-0_1. Springer International Publishing AG, 2017. 309 p.
14. Dodla Srikanth. Quality, Reliability and Maintenance (Q, R & M) Issues in Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)/ Dodla Srikanth, M. Kulkarni // Applied Mechanics and Materials, Vols. 110-116 (2012). – PP.1442-1446.
15. Додонов В.В. Надежность автоматизированных станочных систем/ В.В. Додонов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. № 2 (38). Режим доступа: URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/temp/1370.html>.
16. Долгин В.П. Надежность технических систем: Учебное пособие/ В.П. Долгин, А.О Харченко. – М.: Вузовский учебник, НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 167 с.
17. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. / Л. Клейнрок; Пер. с англ. И.И. Грушко; – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
18. Додонов В.В. Использование элементов теории массового обслуживания для анализа производительности и надежности автоматизированных станочных систем/ В.В. Додонов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 12. – С. 70-76.
19. Сергеев А. И. Влияние параметров оборудования на показатели эффективности гибких производственных ячеек / А.И. Сергеев // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». – Вып. 2. Ч. 2. 2006. № 1. – С. 63-65.
20. Мерзляков А. Ю. Повышение эффективности использования многоцелевых станков при изготовлении корпусных деталей в ГПС путем автоматической оценки состояния режущего инструмента. Дисс. канд. техн. наук. Москва, 1999. – 192 с.
21. Chen M.C. Design of manufacturing systems by a hybrid approach with neural network metamodeling and stochastic local search / M.C. Chen, T. Yang // International Journal of Production Research. – 2002. – Issue 40. – PP. 71-92.
22. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Из-во СевНТУ, 2012. – 304с.
23. Братан С.М. Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования/ С.М. Братан, В.Б. Богуцкий, Ю.К. Новоселов, С.И. Рошупкин// Научные технологии в машиностроении. 2017. № 5 (71). С. 9-18.
24. Богуцкий В. Б. Оценка надежности синтезированного варианта модуля для механической обработки деталей по отказам функционирования / В. Б. Богуцкий, Л. Б. Шрон //Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Научный журнал. № 1 (59). – Симферополь: РИО КИПУ, – 2018. – С.170–176.

References

1. Novy'e proizvodstvenny'e tekhnologii: publicny'j analiticheskij doklad. – M.: Izdatel'skij dom «Delo» RANXiGS, 2015. – 272 p.
2. Raluca Nicolae. Flexibility and efficiency analysis of a flexible manufacturing system/ Raluca Nicolae, Anisor Nedelcu// Review of the Air Force Academy No 1 (28) 2015. – pp.155-158.
3. Sergeev A.I. Naukoemkoe proizvodstvo: strategiya optimizacii zatrat e'kspluatanta / V.B. Kuznecova, A.I. Serdyuk, A.I. Sergeev, D.V. Kondusov // Intellekt. Innovacii. Investicii. 2016. № 4. – pp. 90-94.
4. ENG Flexible Manufacturing System for Mass Customization Manufacturing, Guixiu Qiao, Roberto Lu, and Charles McLean Rezhim dostupa: <http://scg.mit.edu/images/MCPC%202003/site/4-MCP%20Manufactur-ing%20and%20Logistics/9-Qiao.pdf>.
5. M. Carmen Ruiz. Improving performance in flexible manufacturing systems/M. Carmen Ruiz [at all] //The Journal of Logic and Algebraic Programming, 78 (2009). – PP.260-273.
6. Epifanov V.V. Razrabotka tekhnologicheskix struktur metallovezhushhego oborudovaniya s programmny'm upravleniem dlya gruppovoj obrabotki slozhny'x detalej vrashheniya. Diss. dokt. texn. nauk. Ul'yanovsk, 2005. – 323 p.
7. Hermaste A. Design principles of flexible manufacturing systems / A. Hermaste, J. Riives, K. Sonk, M. Sarkans // 9th International DAAAM Baltic Conference «INDUSTRIAL ENGINEERING» 24-26 April 2014, Tallinn, Estonia. – PP.92-96.
8. Puxov A.S. Sintez reshenij pri poiskovom proektirovanii avtomatizirovanny'x sistem: Monografiya. – Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta, 2009. – 154 p.
9. Tiberiu S. Letia. Analysis and Synthesis of the Flexible Manufacturing System Potential Behaviors/ Tiberiu S. Letia, Adina Astilean, Mihai Hulea//Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Bucharest, Romania, May 23-25, 2012. – PP.248-253.
10. Design for Manufacturing, Assembly, and Reliability. U.S. Department of energy. Rezhim dostupa: URL: https://build4scale.llnl.gov/docs/modules/Module_3C.pdf
11. Koren Y. Reconfigurable Manufacturing Systems / Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, [at all] // Annals of the CIRP Vol. 48/2/1999. – P. 527-540. Rezhim dostupa: URL: http://www-personal.umich.edu/~ykoren/uploads/Reconfigurable_manufacturing.
12. Boguczkiy V.B. Sintez gibkix mexanoobrabatyvayushhix modulej dlya uslovij remontnogo proizvodstva/ V.B. Boguczkiy, L.B. Shron, E.S. Gordeeva //Theoretical & Applied Science. 2017. №11 (55). pp. 101-110.
13. Seongwoo Woo. Reliability Design of Mechanical Systems. A Guide for Mechanical and Civil Engineers DOI 10.1007/978-3-319-50829-0_1. Springer International Publishing AG, 2017. 309 p.
14. Dodla Srikanth. Quality, Reliability and Maintenance (Q, R & M) Issues in Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)/ Dodla Srikanth, M. Kularni // Applied Mechanics and Materials, Vols. 110-116 (2012). – PP.1442-1446.
15. Dodonov V.V. Nadezhnost' avtomatizirovanny'x stanochny'x sistem/ V.V. Dodonov // Inzhenerny'j zhurnal: nauka i innovacii. 2015. № 2 (38). Rezhim dostupa: URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/temp/1370.html>.
16. Dolgin V.P. Nadezhnost' texnicheskix sistem: Uchebnoe posobie/ V.P., Dolgin, A.O. Xarchenko. – M.: Vuzovskij uchebnik, NIZ INFRA-M, 2015. – 167 p.
17. Klejnrok L. Teoriya massovogo obsluzhivaniya. / L. Klejnrok; Per. s angl. I.I. Grushko; – M.: Mashinostroenie, 1979. – 432 p.
18. Dodonov V.V. Ispol'zovanie e'lementov teorii massovogo obsluzhivaniya dlya analiza proizvoditel'nosti i nadezhnosti avtomatizirovanny'x stanochny'x sistem/ V.V. Dodonov // Izvestiya vysshix uchebny'x zavedenij. Mashinostroenie. 2011. № 12. – pp. 70-76.
19. Sergeev A.I. Vliyanie parametrov oborudovaniya na pokazateli e'ffektivnosti gibkix proizvodstvenny'x yacheek / A.I. Sergeev // Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Texnicheskie nauki». – Vy'p. 2. Ch. 2. 2006. № 1. – pp. 63-65.
20. Merzlyakov A.Yu. Povy'shenie e'ffektivnosti ispol'zovaniya mnogocelevy'x stankov pri izgotovlenii korpusny'x detalej v GPS putem avtomaticheskoy ocenki sostoyaniya rezhushhego instrumenta. Diss. kand. texn. nauk. Moskva, 1999. – 192 p.
21. Chen M.C. Design of manufacturing systems by a hybrid approach with neural network metamodeling and stochastic local search / M.C. Chen, T. Yang // International Journal of Production Research. – 2002. – Issue 40. – pp. 71-92.
22. Novoselov Yu.K. Dinamika formoobrazovaniya poverxnostej pri abrazivnoj obrabotke / Yu.K. Novoselov. – Sevastopol': Iz-vo SevNTU, 2012. – 304 p.
23. Bratan S.M. Modelirovanie processa stoxasticheskogo vzaimodejstviya instrumenta i zagotovki na operaciyax shlifovaniya/ S.M. Bratan, V.B. Boguczkiy, Yu.K. Novoselov, S.I. Roshhupkin// Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii. 2017. № 5 (71). pp. 9-18.
24. Boguczkiy V.B. Ocenka nadezhnosti sintezirovannogo varianta modulya dlya mexanicheskoy obrabotki detalej po otkazam funkcionirovaniya / V.B. Boguczkiy, L.B. Shron //Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Nauchny'j zhurnal. № 1 (59). – Simferopol': RIO KIPU, – 2018. – pp.170–176.

УДК 621.923

ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА И ЗАГОТОВКИ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ

С.М. Братан¹, А.О. Харченко¹, С.И. Рощупкин¹, Е.А. Владецкая¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса наружного шлифования. При этом используется описание эквивалентного динамического звена, которое преобразует стандартный сигнал в виде гауссовского белого шума в случайный процесс. Для настроек формирующего фильтра получены результаты статистической обработки профилограмм рабочей поверхности шлифовального круга. Построенный формирующий фильтр позволяет охарактеризовать статистические свойства шлифовального круга и заготовки. Разработанная математическая модель операции плоского наружного шлифования может быть использована для оценок характеристик качества обработанных деталей и систем автоматического управления процессом при решении задачи интенсификации производства.

Ключевые слова: операция шлифования, динамическое звено, профилограмма, формирующий фильтр, структурная схема динамики процесса.

MODELING OF DYNAMIC LINKS, WHICH CHARACTERIZE STATIC PROPERTIES OF GRINDING WHEEL AND WORKPIECE DURING FLAT GRINDING PROCESS

S.M. Bratan¹, A.O. Kharchenko¹, S.I. Roshchupkin¹, E.A. Vladetskaya¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article considers the results of theoretical and experimental studies of the process of external grinding on the basis of the developed dynamic model. It uses the description of an equivalent dynamic link that converts a standard signal in the form of Gaussian white noise to a random process. For the settings of the forming filter, the results of statistical processing of profilograms of the working surface of the grinding wheel are obtained. The constructed forming filter makes it possible to characterize the statistical properties of the grinding wheel and workpiece. The developed mathematical model of the operation of flat external grinding can be used to assess the quality characteristics of machined parts and systems of automatic process control when solving the problem of intensification of production.

Keywords: grinding operation, dynamic link, profilogram, forming filter, structural diagram of the dynamics of the process.

Анализ экспериментальных и литературных данных [1, 2] (табл. 1) показывает, что шлифовальный круг является наиболее слабым звеном в технологической системе и оказывает наибольшее влияние на стабильность параметров качества деталей. Его состояние непрерывно изменяется в процессе обработки. На режущих кромках инструмента появляются площадки износа, увеличивается плотность вероятности распределения кромок по глубине, поверхность круга становится волни-

стой, вследствие чего (по данным С.Н.Корчака [3]) режущая способность инструмента за период его стойкости уменьшается на 40...50%.

Наличие колебаний в отклонениях расположения и шероховатости поверхности объясняются возмущающими воздействиями в технологических процессах, вызванных нестабильностью технологической системы. Таким образом, возможности обеспечения высококачественной обработки в современных технологиях шлифования в значительной

степени определяются состоянием рельефа кругов и условиями его контактирования с обрабатываемым материалом. При дальнейшем совершенствовании процессов абразивной обработки возникает необходимость стабилизации профиля инструмента и изучения динамики этих процессов.

При моделировании процесса шлифования необходимо получение модельных данных об отклонении радиуса шлифовального круга от номинального значения. Как показано в работах [4,5], для решения такой задачи необходима разработка описания эквивалентного динамического звена, которое преобразует стандартный сигнал в виде гауссовского белого шума в случайный процесс. Для настроек формирующего фильтра требуются результаты статистической обработки профилограмм рабочей поверхности шлифовального круга.

В проводимых исследованиях состояния

рельефа использован метод профилографирования поверхности круга [6-8]. Профилограммы круга снимались в направлении, перпендикулярном вектору скорости резания непосредственно на круглошлифовальном станке, оборудованном тензометрическим устройством, общий вид и отдельные элементы которого изображены на (рис. 1 и 2).

Деформации щупа с помощью тензодатчиков и усилителя регистрировались на записывающем устройстве. Отметка полного оборота производилась датчиком фазового расположения заготовки и отметчиком фазы, выполненным в виде диска с прорезью. Диск закреплялся на оправке соосно с кругом. Частота собственных колебаний щупа составила 200 Гц, что более чем на два порядка превышает частоту вынужденных колебаний круга при профилографировании обработанной поверхности. Графики тарировки датчиков имели линейный характер.

Таблица 1. Параметры подсистем операции шлифования

Подсистемы	Параметр состояния подсистемы	Выходные переменные, на которые влияет параметр состояния	Процент влияния	Периодичность восстановления
Станок	Жесткость	Точность обработки, шероховатость поверхности	15...20	10 лет
	Точность перемещений	Точность, шероховатость поверхности	50...80 15...20	3...5 лет 3...5 лет
Система управления	Точность управляющих сигналов	Точность обработки	—	Устраняется с ликвидацией неисправности
Приспособление	Жесткость Точность базирования и закрепления заготовок	Точность обработки Точность обработки	15...20 60...100	12...18 месяцев
СОТС	Состав	Производительность	30...40	1...2 недели
	Температура	Точность	15...20	
Инструмент	Степень загрязнения	Производительность	30...40	20...60 минут
		Шероховатость поверхности	50...80	
		Точность формы детали, Шероховатость поверхности	60...100 40...60	
		Производительность	60...80	
Инструмент	Форма режущих кромок и их распределение	Физико-механическое состояние поверхностного слоя	80...100	10...40 минут
		Шероховатость поверхности	50...60	

Спектральный состав отклонений профилей исследовался с помощью гармонического анализа профилограмм. В результате

расчетов получены для исследуемых частот соответствующие значения амплитуд и фаз, позволяющие описать профили в различные

моменты времени тригонометрическим полиномом Фурье:

$$r(\varphi) = r_o + \sum (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi)$$

или

$$r(\varphi) = r_o + \sum A_k \cos(k\varphi + \psi_k) \quad , \quad (1)$$

где r_o – среднее значение радиус-вектора; a_k и b_k – соответственно амплитуда косинусной и синусной составляющих; k – номер гармоники; ψ_k – фаза.

Установка снабжена вибродатчиком (частота вынужденных колебаний – 40 Гц).

Параметры ощупывающих игл: радиусы округления – 2 и 3 мкм; длина вершин клина игл – 0,43 и 0,25 мм.

Скорости перемещения иглы относительно рабочей поверхности инструмента составляют 1,0 и 0,4 мм/с.

Изучение состояния рабочей поверхности инструмента выполнено при обработке образцов из стали 40Х (размерами $d \times l = 40 \times 50$ мм) кругом 1 400×12×127 24А F100 НСТ36К со скоростью круга 35 м/с, и скоростью детали 0,18 м/с, продольной подачей 0,02 м/с, поперечной подачей 0,01 мм/дв.ход. Профиль поперечного сечения инструмента записан (рис. 3) после правки и после соответственно 10, 20 и 30 мин его работы.

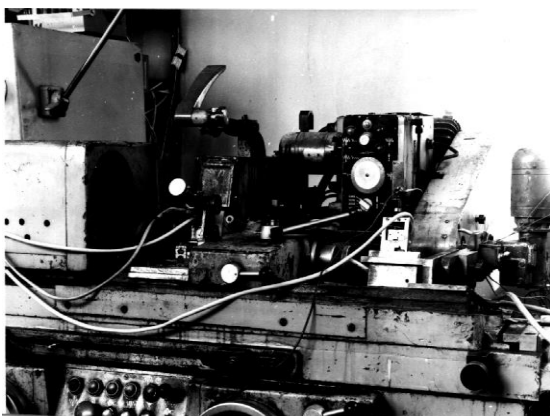


Рис. 1. Общий вид установки



Рис. 2. Устройство для профилографирования инструмента

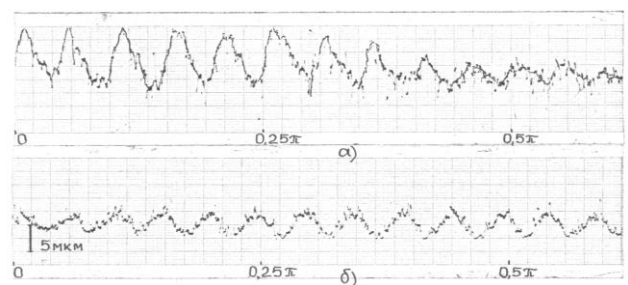


Рис. 3. Пример фрагмента профилограмм участков поперечного сечения шлифовальных кругов при работе в режиме затупления (а) 24А F80 НСТ36К ($t = 12,5$ мин) и самозатачивания (б) 24А F100НСТ15К ($t = 60$ мин)

Результаты гармонического анализа показывают, что у правленного шлифовального круга существенны 1-я, 2-я и 3-я гармоники. Наличие 1-ой гармоники обусловлено дисбалансом, а 2-я и 3-я гармоники определяются точностью изготовления инструмента. С течением времени обработки постепенно растут амплитуды 1-й и 22...25-й гармоник. Высшие частоты соответствуют числу волн на круге, которое определялось по отношению длины профилограммы между отметками полного оборота к шагу волн по вершинам S_w . По мере затупления инструмента шаг S_w увеличивается, а число волн уменьшается в среднем с 25 в начале периода стойкости – до 21...22 в конце. Одновременно наблюдается рост амплитуд A_k преобладающих частот. С течением времени шлифования увеличиваются также средняя $W_{k\text{ ср}}$ и максимальная $W_{k\text{ max}}$ высоты волнистости и их отклонения от средних значений.

Подобные изменения в профиле шлифовального круга отрицательно сказываются на качестве детали: с увеличением средней высоты на круге $W_{k\text{ ср}}$ соответственно увеличиваются шероховатость поверхности R_a и средняя высота волнистости $W_{g\text{ ср}}$. К концу периода стойкости (20 мин) R_a возрастает в 2 раза, а средняя высота волнистости $W_{g\text{ ср}}$ – в 3 раза.

Гармонический анализ отдельных участков инструмента с четко выраженной высотой $W_{g\text{ ср}}$ и шагом волнистости S_w показал существенные различия амплитуды $A_{\text{пр}}$ преобладающей гармоники от ее значения $A_{\text{пр}}$, определенного как половина средней высоты волны ($A_{\text{пр}} = 0,5W_{k\text{ ср}}$). Отсутствие какой-либо одной гармоники преобладающей частоты и увеличение дисперсии профиля шлифовального круга $D[R]$ вызвано случайным характером явлений, происходящих при шлифовании, анизотропией инструмента, отклонением вектора результирующей силы резания от нормали к его поверхности, непостоянством шага волнистости, вызванным изменением жесткости S_k в зоне контакта «шлифовальный круг-заготовка».

Профилограммы поверхности круга, отображающие отклонение формы круга от заданной, представляют собой реализацию процесса формообразования круга. В силу того, что отклонение формы от заданной определяется большим количеством неконтролируемых независимых случайных факторов, они относительно стабильны в процессе обработки каждой детали, а отклонение формы может характеризоваться квазистационарным гауссовским случайным процессом. Такой процесс характеризуется математическим ожиданием (параметрами формы круга) и отклонениями формы, характеризуемыми корреляционной функцией. Корреляционная функция построена непосредственно по профилограмме

$$R_{xx}(\theta) = E\{x(\varphi) \cdot x(\varphi + \theta)\}, \quad (2)$$

где E – операция определения математического ожидания; $x(\varphi)$ – характеристики слу-

чайного процесса (абсцисса и ордината профилограммы).

Для конечных реализаций всегда существуют спектральные плотности, определяемые преобразованиями Фурье по формулам Винера – Хинчина:

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\theta) e^{-j2\pi\omega\theta} d\theta \quad (3)$$

Численными методами получены графики зависимостей $R_{xx}(\theta)$ и $S_{xx}(\omega)$ (рис. 4 и 5).

Корреляционная функция отклонения формы круга $R_{xx} = R(x)$ должна удовлетворять условиям применимости преобразования Фурье $\int_{-\infty}^{\infty} |R(x)| dx < \infty$, где для шлифовального круга, движущегося с постоянной скоростью, величина $x = v\tau$.

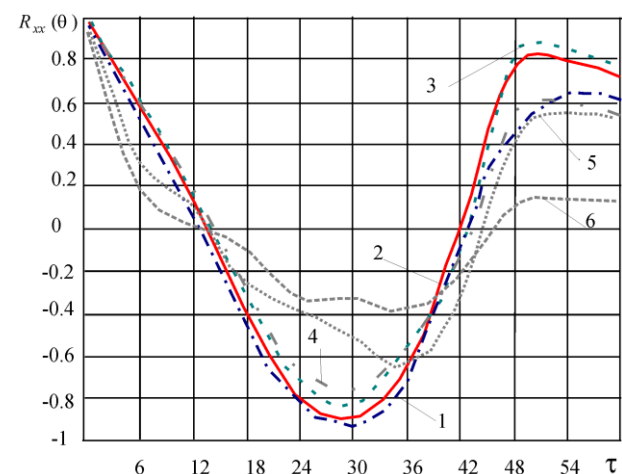


Рис. 4. Корреляционные кривые профиля шлифовального круга ПП400х12х127 24А25НСТ36К $R_{xx}(\theta)$

за период его стойкости: 1 – $\tau = 0$ мин; 2 – $\tau = 10$ мин; 5 – $\tau = 15$ мин (данные проф. Татаркина Е.Ю.) 3 – $\tau = 0$ мин; 4 – $\tau = 10$ мин; 6 – $\tau = 15$ мин (данные проф. Братана С.М.)

Для шлифовального круга она с достаточной степенью точности аппроксимируется зависимостью:

$$R(v\tau) = D e^{(-\alpha v|\tau|)} \cos(\beta v\tau), \quad (4)$$

где D – дисперсия высот неровностей рельефа круга, v – скорость его движения, α, β – соответствующие коэффициенты корреляции.

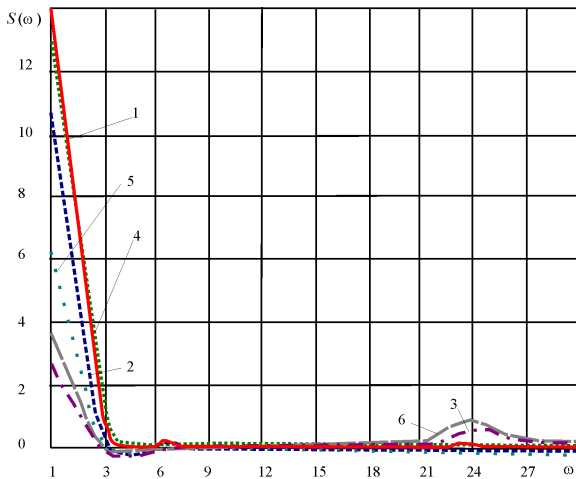


Рис. 5. Спектрограммы профиля шлифовального круга ПП400х12х127 24А25НСТ36К $S_{xx}(f)$ за период его стойкости: 1 – $\tau = 0$ мин; 2 – $\tau = 10$ мин; 3 – $\tau = 15$ мин (данные проф. Татаркина Е.Ю.) 4 – $\tau = 0$ мин; 5 – $\tau = 10$ мин; 6 – $\tau = 15$ мин (данные проф. Братана С.М.)

Переход от корреляционной функции к спектральному представлению может быть осуществлен применением преобразования Лапласа:

$$S(p) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{(-p_1 i \tau)} d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{(-p_2 i \tau)} d\tau, \quad (5)$$

где в рассматриваемом случае $p_1 = i\omega$, $p_2 = -i\omega$.

Подстановка (5) в (4) приводит к результату:

$$S(\omega) = \frac{D(i\omega + \alpha v)}{(i\omega + \alpha v)^2 + \beta^2 v^2} + \frac{D(-i\omega + \alpha v)}{(-i\omega + \alpha v)^2 + \beta^2 v^2}, \quad (6)$$

и после соответствующих упрощений выражение для спектральной плотности (6) приобретает вид:

$$S(y) = D \frac{a + by}{y^2 + cy + d}, \quad (7)$$

где $a = 2\alpha^3 v^3 + 2\alpha v^3 \beta^2$; $b = 2\alpha v$;
 $c = 2\alpha v^2 (\alpha^2 - \beta^2)$; $d = v^4 (\alpha^2 + \beta^2)$,
 $y = \omega^2$.

Как известно, экстремумам функции $S(\omega)$ соответствуют нули ее производной.

После дифференцирования $S(y)$ по y , восстановления $y = \omega^2$ и приведения к общему знаменателю, получим:

$$S(\omega) = 2\omega D \times \left(\frac{b(\omega^4 + c\omega^2 + d) - (a + b\omega^2)(2\omega^2 + c)}{(\omega^4 + c\omega^2 + d)^2} \right) \quad (8)$$

Полюса функции (8) совпадают с нулями ее числителя. Кроме того, должен быть учтен ноль, соответствующий $\omega_{1,2} = \pm\infty$ и $\omega_3 = 0$.

Нулями числителя (8) являются:

$$\omega_{4,5} = \pm v \sqrt{-\alpha^2 - \beta^2 + 2\beta \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}},$$

$$\omega_{6,7} = \pm i v \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + 2\beta \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}.$$

Условиям физической реализуемости экстремумов удовлетворяют корни ω_1, ω_4 и ω_3 – при условии $\beta > \frac{1}{3}\sqrt{3\alpha}$.

Результаты анализа показывают, что максимуму функции (7)

$$S(\omega)_{\max} = \frac{1}{2} D \frac{\alpha \sqrt{\beta^2 + \alpha^2}}{v \beta (\beta^2 + \alpha^2 - \beta \sqrt{\beta^2 + \alpha^2})} \quad (9)$$

соответствует частота

$$\omega = v \sqrt{-\alpha^2 - \beta^2 + 2\beta \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}. \quad (10)$$

Из соотношений (9) и (10) непосредственно следует, что, так как параметры α и β зависят только от характеристик рельефа и не зависят от скорости движения инструмента, то максимальное значение спектральной плотности обратно пропорционально скорости движения круга v , а частота, соответствующая этому максимуму, пропорциональна этой скорости.

Как было указано выше для моделирования и синтеза динамических систем целесообразно построение формирующего фильтра. Структура такого фильтра может быть определена методом факторизации дробно-рациональной функции (7) с выде-

лением нулей и плюсов, лежащих в левой полуплоскости [9,10]. Передаточная функция для соответствующего динамического звена имеет вид:

$$W(p) = \frac{K(Tp + 1)}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (11)$$

в котором необходимо определить параметры K, T_1, T_2, T_3 .

Известно, что спектральная плотность входного и выходного сигналов динамического звена связаны между собой соотношением [11]:

$$S_{\text{вых}}(\omega) = S_{\text{вх}}(\omega) |W(j\omega)|^2, \quad (12)$$

где в соответствии с выражением (8)

$$|W(j\omega)|^2 = \frac{K^2(T_3^2\omega^2 + 1)}{T_1^2\omega^4 + (-2T_1 + T_2^2)\omega^2 + 1}. \quad (13)$$

Для белого шума с единичной интенсивностью $S_{\text{вх}}(\omega) \equiv 1$ неизвестные коэффициенты в выражении (11) могут быть определены по параметрам спектральной плотности (7), например, методом неопределенных множителей Лагранжа в виде:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{v^2(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad T_2 = \frac{2\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}, \\ T_3 &= \frac{1}{v(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad K = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}} \end{aligned} \quad (14)$$

Построенный формирующий фильтр позволяет охарактеризовать статистические свойства шлифовального круга и заготовки. С учетом моделей, полученных в первой части работы структурная схема операции плоского наружного шлифования примет вид, представленный на (рис. 6).

Предложенная структурная схема позволяет представить следующие доли воздействий отклонений от расчетного режима на качество обработки:

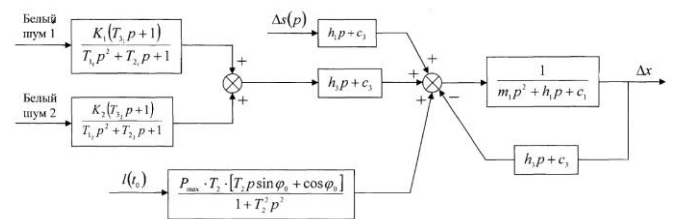


Рис. 6. Структурная схема динамики процесса плоского наружного шлифования

- влияние отклонения вертикальной подачи шлифовального круга ΔS от номинального значения S_0

$$W_{ds} = \frac{-c_1 - h_1 p}{m_1 p^2 + (h_1 + h_3)p + c_1 + c_3};$$

- влияние отклонения формы шлифовального круга ΔR от номинального значения R_0

$$W_{dR} = \frac{K_1(T_{31}p + 1)}{T_{11}p^2 + T_{21}p + 1} \times \frac{h_3 p + c_3}{m_1 p^2 + (h_1 + h_3)p + c_1 + c_3};$$

- влияние отклонения толщины детали ΔL от номинального значения L_0

$$W_{dL} = \frac{K_2(T_{32}p + 1)}{T_{11}p^2 + T_{22}p + 1} \times \frac{h_3 p + c_3}{m_1 p^2 + (h_1 + h_3)p + c_1 + c_3};$$

- влияние дисбаланса

$$W_Q = \frac{P_{\max} \cdot T_2}{1 + T_2^2 p^2} \cdot \frac{[T_2 p \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0]}{m_1 p^2 + (h_1 + h_3)p + c_1 + c_3}.$$

Разработанная математическая модель операции плоского наружного шлифования может быть использована для оценок характеристик качества обработанных деталей и систем автоматического управления процессом плоского наружного шлифования, решающих задачи интенсификации производства.

Список литературы

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 232 с.
2. Королев В.А. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / В.А. Королев. – Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та. 1975. – 192 с.
3. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
4. Братан С.М. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник / С.М. Братан, Е.А. Левченко, Н.И. Покинтелица, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 228 с.
5. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавающих мастерских: монография / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 154 с.
6. Лобанов Д.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, П.В. Архипов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 3-1 (33-1). С. 85-91.
7. Лобанов Д.В. Методика прогнозирования поврежденности твердого сплава при затачивании инструмента для обработки неметаллических композитов/ Д.В. Лобанов, Н.В. Мулюхин // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5. №1-2. С. 78-84.
8. Братан С.М. Синтез фильтра Калмана-Бюсси для оценивания состояния операции шлифования / С.М. Братан, Д.Е. Сидоров, В.Б. Богущий // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2015. – с. 87-91.
9. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавающей мастерской/ Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314). – С.88-103.
10. Владецкая Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавающей ремонтной мастерской / Е.А. Владецкая // Вісник СевНТУ. – Вип.150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – С. 36-40.
11. Харченко А.О. Реакция динамической системы на произвольный сигнал на примере станка в условиях плавающей мастерской / А. Харченко, Е. Владецкая, В.Долгин, С. Братан // Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne» (Машины и производственные процессы).– Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015. – С. 86-98.

References

1. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke / YU.K. Novoselov. – Saratov: Izd-vo Saratov. un-ta, 1979. – 232 s.
2. Korolev V.A. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke / V.A. Korolev. – Saratov: Izd-vo Saratovsk. un-ta. 1975. – 192 s.
3. Korchak S.N. Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniya stal'nykh detaley / S.N. Korchak. –M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 280 s
4. Bratan S.M. Avtomaticheskoye upravleniye protsessami mekhanicheskoy obrabotki: uchebnik / S.M. Bratan, Ye.A. Levchenko, N.I. Pokintelitsa, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 228 s.
5. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2018. – 154 s.
6. Lobanov D.V. Napriazhenno-deformirovannoe sostoyanie tverdosplavnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivanii/ D.V Lobanov., A.S. Ianiushkin P.V. Arkhipov // Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 3-1 (33-1). S. 85-91.
7. Lobanov D.V. Metodika prognozirovaniia povrezhdennosti tverdogo splava pri zatachivanii instrumenta dlia obrabotki nemetallicheskih kompozitov/ D.V.Lobanov, N.V. Muliukhin // Aktual'nye problemy v mashinostroyenii. 2018. T. 5. №1-2. S. 78-84.
8. Bratan S.M. Sintez fil'tra Kalmana-Byussi dlya otsenivaniya sostoyaniya operatsii shlifovaniya / S.M. Bratan, D.Ye. Sidorov, V.B. Bogutskiy, // Sovremennyye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii.– Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2015. – s. 87-91.
9. Vladeckaya E.A. Obespecheniye kachestva shlifoval'noy obrabotki putem umen'sheniya vneshnih vozmushhenij v usloviyah plavuchej masterskoj/ E.A. Vladeckaya, S.M. Bratan, A.O. Harchenko, D.O. Vladeckiy // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. — Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314).– S.88-103.
10. Vladeckaya E.A. Razrabotka formiruyushchego fil'tra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchej remontnoj masterskoj / E.A. Vladeckaya // Visnik SevNTU. – Vip.150: Mashinopriladobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – S. 36-40.
11. Harchenko A.O. Reakciya dinamicheskoy sistemy na proizvol'nyj signal na primere stanka v usloviyah plavuchej masterskoj / A. Harchenko, E. Vladeckaya, V.Dolgin, S. Bratan // Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne» (Mashiny i proizvodstvennye processy).– Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015.– S. 86-98.

УДК 621.923

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

В.В. Гусев¹, Д.С. Лазарев¹, Д.А. Моисеев¹¹Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

Аннотация

В работе рассмотрен процесс правки алмазных шлифовальных кругов свободным абразивом из карбида кремния черного марка 54С зернистостью F60. проведены экспериментальные исследования влияния давления на притир и его твердости на вероятность шаржирования в него абразивных зерен. Установлено, что вероятность шаржирования абразива в материал линейно зависит от его твердости и давления, которое не должно приводить к разрушению зерен свободного абразива в зоне контакта. Используя рациональные характеристики материала притира и давления в зоне его контакта с кругом можно повысить эффективность процесса правки алмазного круга свободным абразивом за счет увеличения выступания алмазных зерен из связки при сокращении длительности процесса правки.

Ключевые слова: шлифование, алмазный шлифовальный круг, керамика, свободный абразив, управление режущей способностью шлифовального круга.

THE CHOICE PARAMETERS TO MANAGE CUTTING ABILITY OF DIAMOND GRINDING WHEEL WITH A FREE ABRASIVE

V. V. Gusev¹, D. S. Lazarev¹, D. A. Moiseev¹¹Donetsk national technical University, Donetsk, Donetsk, Ukraine

Abstract

The process of dressing diamond grinding wheels with a free abrasive made of silicon carbide black grade 54C with grain size F60 is considered. Experimental studies of the effect of pressure on the lap and its hardness on the probability of carving abrasive grains into it are carried out. It is established that the probability of the abrasive carving into the material is linearly dependent on its hardness and pressure, which should not lead to the destruction of grains of free abrasive in the contact zone. Using the rational characteristics of the lapping material and the pressure in the area of its contact with the circle, it is possible to increase the efficiency of the process of straightening the diamond grinding wheel by a free abrasive by increasing the protrusion of diamond grains from the binder with a shortening of the dressing process

Keywords: grinding, diamond grinding wheel, technical ceramics, free abrasive, manage cutting ability grinding wheel.

Введение

Основным видом механической обработки керамики, обладающей высокой твердостью и хрупкостью, является шлифование алмазными шлифовальными кругами (АШК). Так как процесс обработки производится путем непосредственного контакта двух поверхностей, то и качество шлифования напрямую зависит от характеристики и состояния круга. Зерна шлифовального круга, участвующие в работе, испытывают пе-

риодическое силовое, тепловое и химическое воздействие в момент контакта с обрабатываемой заготовкой. В результате этого, режущие кромки зерен истираются или скалываются, происходит вырывание целых зерен из связки круга. Неравномерный износ АШК приводит к искажению его формы, изменяются его режущие свойства, возрастает сила резания. Все выше перечисленные явления влияют на качество обрабатываемой поверхности [1,2].

Правка – процесс восстановления режущей способности шлифовального круга и

правильной геометрической формы инструмента. Правке подвергается вновь устанавливаемые на станок инструменты и затупившиеся в процессе работы. На правку расходуется от 45% до 80% полезного объема шлифовального круга. Затраты на правку могут достигать до 40% штучного времени обработки и более. Методы правки кругов на металлической связке по характеру воздействия на РПК делятся на [3]: механические, химические, физические и комбинированные.

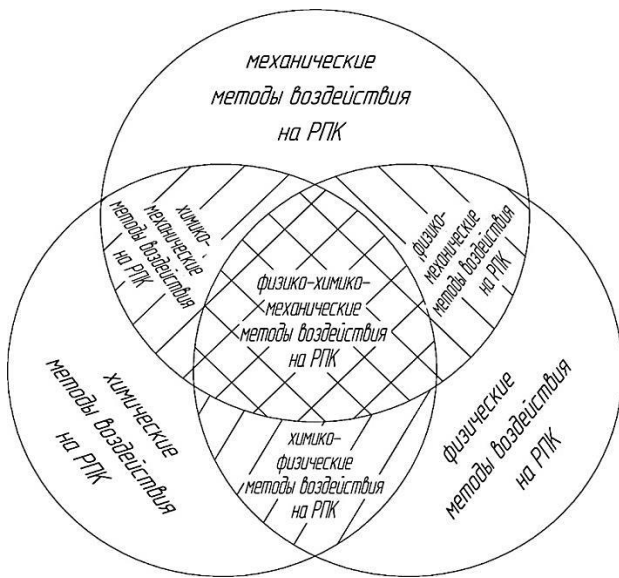


Рис. 1. Методы управляющих воздействий на РПК

Связь между этими методами может быть представлена в виде следующей схемы (рис. 1). Наиболее простым и эффективным управляющим воздействием является разновидность механического метода, к которому относится правка свободным абразивом [4,5]. Этот метод отличается, по сравнению с другими механическими методами правки, более мягким воздействием на алмазные зерна круга и большей избирательностью воздействия на связку круга. Процесс управляющих воздействий свободного абразива — можно представить как процессы абразивного износа связки ШК и притира.

При вращении шлифовального круга в зазор между кругом и притиром попадает абразив, который увлекается поверхностью круга. В процессе перекатывания зерна сво-

бодного абразива в рабочей зоне и их шаржирования в притир связка удаляется. Для сокращения времени восстановления режущей способности РПК воздействие свободного абразива на рабочую поверхность круга желательно осуществлять при рациональных для данных условий режимах правки (а именно, скоростей притира и абразива).

В качестве управляющей подсистемы для правки выступает устройство правки ШК, на вход которой поступает вектор управляющей информации, в качестве которой выступает длительность T_{np} и периодичность T воздействия устройства восстановления режущей способности алмазного круга. Их значения определяют от величины удаленного объема Q_{np} припуска при шлифовании и интенсивностью этого процесса, которые зависят от физико-механических характеристик обрабатываемого материала, требований к качеству поверхностного слоя и режимов обработки заготовки. В подсистеме устройства для правки ШК можно выделить подсистему притира. Входными параметрами этой подсистемы являются форма и размеры притира, площадь $F_{аб}$ поперечного отверстия для подачи абразивной смеси, материал из которого изготовлен притир, физико-механические свойства притира и абразива, размер абразивных зерен, характеризующийся средним размером зерна и плотностью их распределения по диаметру, состав абразивной смеси (концентрация абразива, прочность абразивной смеси). Выбор характеристики свободного абразива подробно рассмотрен в работе [6]. Все выше перечисленные входные параметры на устройство для воздействия на РПК алмазного ШК задаются перед правкой и их можно назвать статично изменяемыми, так как мы не имеем возможности изменять их в процессе управления состоянием инструмента.

Выбор скорости движения притира, интенсивности подачи абразивной смеси подробно рассмотрен в работах [6, 7].

До настоящего времени отсутствуют данные по влиянию материала притира на

эффективность процесса правки. Будем считать при исследованиях, что физико-химические процессы на поверхности притира не происходят.

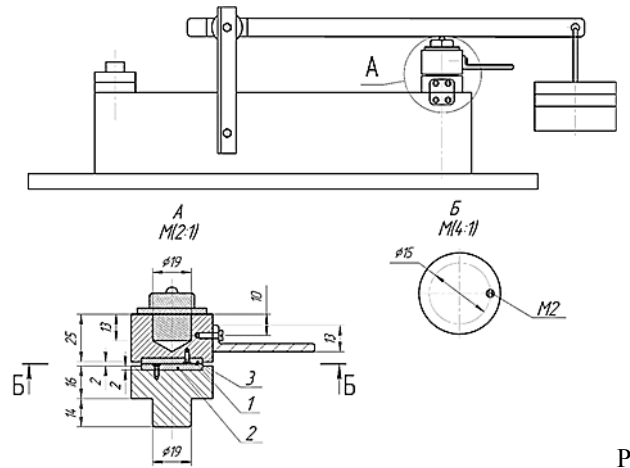
Воздействие свободного абразива на РПК необходимо прекращать, когда режущая способность круга достигнет определенного, заданного уровня, что позволит исключить чрезмерный расход алмазов и нерациональный расход правящего абразива. Эффективность процесса можно оценить временем воздействия свободного абразива и величиной выступления алмазных зерен из связки ΔR на РПК после правки.

Целью работы является исследование влияния шаржирования абразивных зерен в притир на эффективность процесса правки свободным абразивом.

Обсуждение и результаты

Влияние материала притира на процесс правки оценивалось вероятностью шаржирования P зерен в материал притира. Для анализа процесса шаржирования зерен в материал притира нами была разработана установка (рис. 2), на основе работы Маслова Л. Н. [7].

Работает приспособление следующим образом. Неподвижный образец 2 Ø20 мм изготавливался из исследуемых материалов для притира. Подвижный образец 3 изготавливался из меди М1. Перед исследованием на шаржирование образцы притирались последовательно алмазными пастами зернистостью 40/28 и 20/14. Между исследуемыми материалами 3 и 2 помещался слой свободного абразива 1 из карбида кремния черного марка 54С зернистостью F60 (0,3-0,25 мм). ККЧ характеризуют высокая твёрдость, режущая способность, механическая прочность, химическая и термическая стойкость. Для всех опытов количество абразива оставалось постоянным массой 0,06 г. Взвешивание абразива производилось с помощью весов LP123В с точностью до $\pm 0,002$ г.



ис.2. Схема приспособления для исследования образцов

В качестве исследуемых материалов были выбраны: СЧ-10 (HB=100 МПа), СЧ-15 (HB=128), Сталь 45 (HB=226), Сталь 45 (закалка в масле с отпуском HB=314) и Сталь 40X (закалка в масле с высоким отпуском HB=235). Замер твердости материалов производился на твердомере модели ТК-2М.

Давление на поверхности образцов выбиралось в соответствии с их величинами при правке. После приложения усилия верхний медный образец проворачивался с помощью рукоятки 11 на 360^0 , в соответствии с методикой определения шаржирования, предложенной в работе [8]. После снятия нагрузки образцы снимались и поворачивались для встряхивания не шаржированных зерен. Поверхности образцов исследовались с помощью микроскопа МИР-2 в 16 точках. Количество точек на поверхности образца выбиралось из условия достижения надежности результатов $\alpha=0,95$ и точности $\varepsilon=0,5$.

По результатам исследования поверхностей образцов определялось количество внедренных зерен абразива в их поверхность. Вероятность шаржирования определялась по зависимости:

$$P = n_{cp} \times S_{\text{обп}} / S_{MK} \times n_H, \quad (1)$$

где $n_{\text{ср}}$ – среднее число шаржированных зерен; $S_{\text{обр}}$ – площадь исследуемого образца; $S_{\text{МК}}$ – площадь, исследуемая в поле микроскопа; $n_{\text{н}}$ – число зерен в навеске.

Влияние нагрузки на вероятность шаржирования абразивных зерен в поверхность образцов представлено на (рис.3).

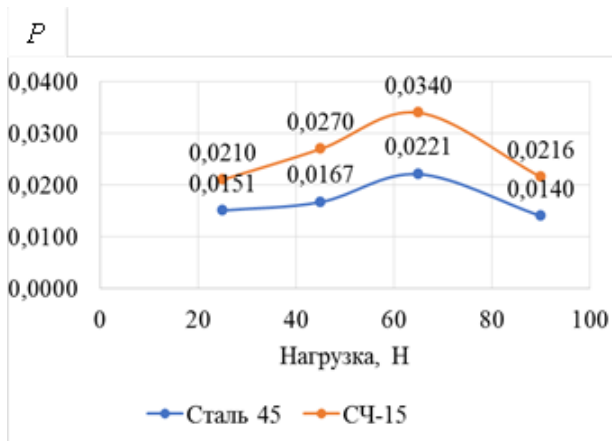


Рис. 3. Вероятность шаржирования абразива в образцы из чугуна СЧ-15 и сталь 45 от нагрузки

Зависимость вероятности шаржирования от нагрузки носит экстремальный характер. При увеличении силы свыше 65 Н доля зерен, которые разрушились в зоне контакта, возрастает, что и приводит к уменьшению вероятности шаржирования, так как достигаются предельные разрушающие нагрузки в условиях статического разрушения зерен ККЧ между металлическими поверхностями [9,10].

При постоянной нагрузке 65 Н было проведено исследование влияние твердости материала притира на вероятность шаржирования абразива в материал притира. График зависимости вероятности шаржирования абразива ККЧ марки 54С зернистостью F60 в поверхность исследуемых материалов от их твердости представлен на рис. 4.

Корреляция между вероятностью шаржирования и твердостью поверхности образцов составляет 0,832.

Для анализа влияния вероятности шаржирования абразивных зерен в поверхность притира и твердости материала притира на параметры процесса правки воспользуемся математической моделью и программой, разработанной в ДонНТУ [4].

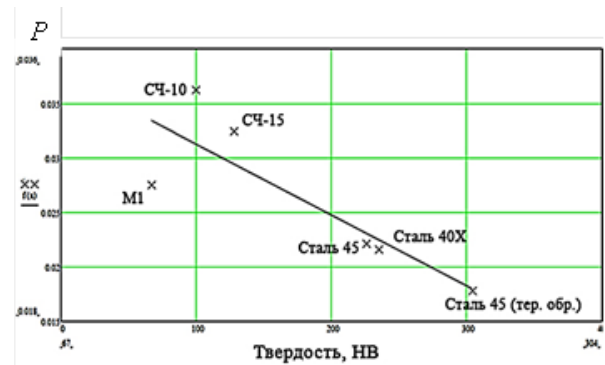


Рис. 4. Зависимости вероятности шаржирования абразива ККЧ в поверхность образцов в зависимости от их твердости

На графике строились зависимости (рис. 5): 1 – максимальная величина выступания $\Delta R(\tau)$ алмазных зерен из связки круга от времени правки, 2 – величина износа связки круга от времени правки, 3 – величина износа ШК по вершинам зерен от времени правки.

Время правки определяли по зависимости вылета зерен из связки от времени правки (кривая 1, рис. 5), которая асимптотически приближается к максимальному значению. Время правки определить, когда значение выступания зерен составляет 95% от максимального значения.

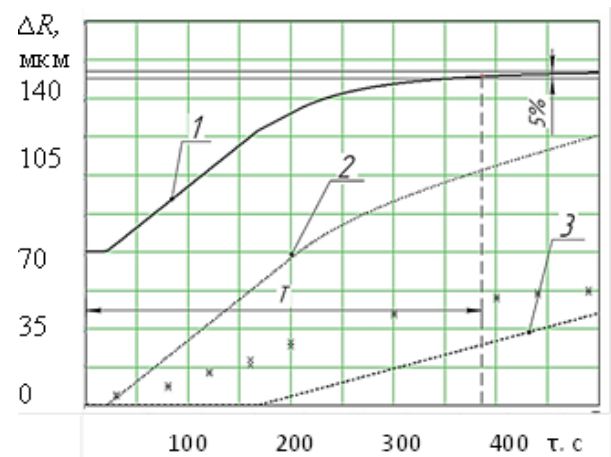


Рис. 5. Зависимостей от времени правки (τ): 1 – максимальной величины выступания ΔR алмазных зерен из связки, 2 – величины износа связки круга, 3 – величины износа ШК по вершинам зерен

При моделировании процесса правки в зависимости от принятого материала притира определяли максимальную величину выступания зерен из связки и время правки. По

результатам моделирования был построен график, представленный на рис.6.

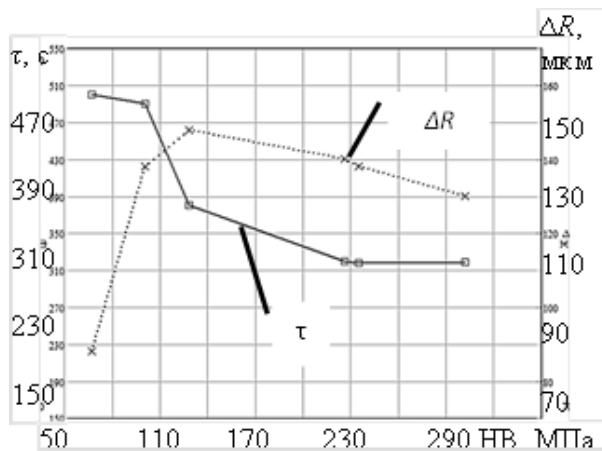


Рис.6. Зависимости от твердости материала притира, HВ: времени правки (τ) и высоты выступания зерен ШК (ΔR)

Как видно из рис.6 твердость материала притира и вероятность шаржирования свободного абразива в материал притира оказывает влияние на длительность процесса правки и максимальную величину выступания зерен из связки АШК. При выборе материала притира, исходя из достижения максимальной величины выступания зерен из связки АШК, наиболее эффективным является материал марки СЧ-15, с твердостью 128 HВ.

Выводы

Экспериментальные исследования показали, что вероятность шаржирования абразива в материал зависит от его твердости. Применяя в качестве притира чугун серый марки СЧ-15 по сравнению со сталью 40Х можно увеличить вероятность шаржирования абразивных зерен в 1,5.

Применяя при правке давления в зоне контакта притира с кругом, при которых не происходят разрушения зерен абразива, можно повысить эффективность процесса правки за счет повышения вероятности их шаржирования в поверхность притира.

Используя рациональные характеристики материала притира и давления в зоне его контакта с кругом можно повысить эффективность процесса правки алмазного круга

свободным абразивом за счет увеличения выступания алмазных зерен из связки при сокращении длительности процесса правки.

Список литературы

1. Kramer D., Rehsteiner F., Schuhmacher B. ECD (Electrochemical In-Process Controlled Dressing), a New Method for Grinding of Modern High-Performance Cutting Materials to Highest Quality // *Cirp Annals - Manufacturing Technology*. 1999. Vol. 48, no 1. P. 265-268. DOI: 10.1016/S00078506(07)63180-1.
2. Гусев В.В. Силы резания и формирование дефектного слоя при алмазном шлифовании керамики // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць*. – Краматорськ: ДДМА. – 2003.- Вип. №13. – С. 70-76.
3. Полтавец, В.В. Повышение степени управляемости технологической системой шлифования кругами из сверхтвердых материалов за счет воздействий на характеристики инструмента / В. В. Полтавец // *Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. Випуск 6 (154)*. Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С.79-86.
4. Гусев, В.В. Теоретическое исследование механизма взаимодействия свободного абразива со связкой алмазного шлифовального круга при управлении состоянием его рабочей поверхности / В.В. Гусев, А.Л. Медведев // *Вісник СевНТУ Збірник наукових праць Серія: Машиноприладобудування та транспорт*. – Севастополь: СевНТУ, 2014. – Вип. №150. – С.56-61.
5. Бурмистров В.В., Байков А.В. Способ правки абразивного инструмента // *А.с. 1839393 СССР МКИ В 24 В 53/50*. - Бюл. № 47-48. 2 с.
6. Медведев А.Л. Обеспечение режущей способности алмазного шлифовального круга при шлифовании технической керамики за счет формирования его рабочей поверхности: автореферат дис. канд. техн. наук – г. Донецк, 2014 г. – 16 с.
7. Гусев, В.В. Выбор рациональных условий правки алмазных кругов полусвязанным абразивом/ В.В. Гусев, А.Л. Медведев // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Машинобудування і машинознавство»*. – Донецьк: ДонНТУ. – 2009. – Вип. №6 (154). – С.41-48.
8. Маслов, Л.Н. Методика и результаты исследований способности шаржирования абразивом поверхности деталей после высокотемпературной термомеханической обработки // *Интеллектуальные системы в производстве*. №1 (2012) – С.119-121.
9. Киселев, М.Г. Исследование особенностей поведения абразивных зерен при их внедрении в материал подложки при различных условиях нагружения / М.Г. Киселев, А.А. Новиков // *Вестник Гомельского государственного техни-*

ческого университета им. П.О. Сухого. – Минск: Белорусский национальный университет. №4 (23), 2005.

10. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавающих мастерских: монография / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 154 с.

References

1. Kramer D., Rehsteiner F., Schuhmacher B. ECD (Electrochemical In-Process Controlled Dressing), a New Method for Grinding of Modern High-Performance Cutting Materials to Highest Quality // *Cirp Annals - Manufacturing Technology*. 1999. Vol. 48, no 1. P. 265-268. DOI: 10.1016/S00078506(07)63180-1.
2. Gusev V.V. Forces of cutting and formation of a defective layer at diamond grinding of ceramics//*Nad_yn_st to a _nstrument that оптимізація tekhnolog_chny systems. Zb_rnik naukovy праць*. – Kramatorsk: DDMA. – 2003.-VIP. No. 13. – Page 70-76.
3. Poltavets, V.V. Increase in degree of controllability the technological system of grinding by circles from supersolid materials due to impacts on characteristics of the tool / V.V. Poltavets//*Naukov_ праці DONNTU. Ser_ya Mashinobuduvannya i mashinoznnavstvo. Vipusk 6 (154). Donetsk: ДонНТУ, 2009. – Page 79-86.*
4. Gusev, V.V. A theoretical research of the mechanism of interaction of a free abrasive with a linking of a diamond grinding wheel at management of a condition of his working surface / V.V. Gusev, A.L. Medvedev//*V_snik SEVNTU Zb_rnik naukovy праць Ser_ya: Mashinopriladobuduvannya that transport. – Sevastopol: СевНТУ, 2014. – VIP. No. 150. – Page 56-61.*
5. Burmistrov V.V., Baykov A.V. Sposob of editing of the abrasive tool/Ampere-second. 1839393 USSR MCI In 24 V 53/50. - Bulletin No. 47-48. 2 pages.
6. Medvedev A.L. Ensuring the cutting ability of a diamond grinding wheel when grinding technical ceramics due to formation of his working surface: abstract yew. *Cand.Tech.Sci.* – Donetsk, 2014 – 16 pages.
7. Gusev, V.V. Choice of rational conditions of editing of diamond wheels semi-connected abrasive / V.V. Gusev, A.L. Medvedev//*Naukov_ праці Donetsk nats_onal-ny tekhn_chny to an un_versitet. Seriya "Mashinobuduvannya i mashinoznnavstvo". – Donetsk: ДонНТУ. – 2009. – VIP. No. 6 (154). – Page 41-48.*
8. Maslov, L.N. Metodika and results of researches of ability of charging by an abrasive of a surface of details after high-temperature thermomechanical processing//*Intellectual systems in production. No. 1 (2012) – Page 119-121.*
9. Kiselyov, M.G. Issledovaniye of features of behavior of abrasive grains at their introduction in substrate material under various conditions of loading / M.G. Kiselyov, A.A. Novikov//*the Messenger of the Gomel state technical university of P.O. Sukhy. – Minsk: Belarusian national university. No. 4 (23), 2005.*
10. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – М.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2018. – 154 s.

УДК 628.1.038-73

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМООЧИЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д.О. Ерёмченко¹, Н.И. Покинтелица¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Особенностью электрических дистилляторов для промышленности является отсутствие предварительной химической (ионно-обменной) обработки воды, что связано с тем, что в воде растворено определенное количество солей. При вскипании воды повышается концентрации солей, которые выпадают в осадок, образует слой накипи, ухудшая теплопроводность поверхностей аппаратов. Для борьбы с солесодержанием и накипью в основном используется продувка испарителя. Недостатком такого способа является большая потеря тепловой энергии за счет удаления горячей воды. В конструкции предложенного электрического дистиллятора во время работы с накипью можно воспользоваться способностью нагревательных элементов к самоочищению.

Ключевые слова: электрический дистиллятор, дистиллированная вода, самоочищение, термоудар, накипь.

DISTILLED WATER PRODUCTION TECHNOLOGY WITH USING SURFACE OF HEATING ELEMENTS SELF-CLEANING

D.O. Eremenko¹, N.I. Pokintelitsa¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

A feature of electric distillers for the industry is the absence of preliminary chemical (ion-exchange) water treatment, which is due to the fact that a certain amount of salts are dissolved in water. When the water boils, the concentration of salts increases, which precipitate, forms a layer of scale, worsening the thermal conductivity of the surfaces of the apparatus. To control the salt content and scale, the blow down of the evaporator is mainly used. The disadvantage of this method is the large loss of thermal energy due to the removal of hot water. In the construction of the proposed electric distiller, when working with scum, it is possible to use the ability of heating elements to self-purification.

Keywords: electric distiller, distilled water, self-cleaning, thermal shock, scale.

Введение

Дистиллированная вода находит все большее применение в пищевых технологиях, особенно основанных на биологических процессах, например, выращивания специальных штаммов, грибов. Конденсат также широко используется в процессах, связанных с брожением, приготовлением квасцов, пива, алкогольных напитков [1-3]. Если рассмотреть круговорот воды, происходящий на земле, когда под воздействием солнечных лучей вода мирового океана, испаряясь, поднимается вверх, охлаждается,

превращается в конденсат и в виде дождя или снега возвращается на землю. Этот процесс можно сравнить с процессом получения дистиллята. Вода искусственно нагревается до кипения, получаемый пар конденсируется на поверхностях, охлаждаемых водой, и стекает в виде капельного конденсата в сборник дистиллята. В отличие от естественного процесса на испарение воды приходится затрачивать значительное количество энергии. Кроме того, появляется дополнительный расход охлаждающей воды. Например, на испарение 1 кг воды

необходимо 0,8 кВт/ч энергии и около 7-ми литров воды [4].

Выпарные аппараты с естественной циркуляцией относятся к наиболее ранним конструкциям, получившими широкое распространение на предприятиях пищевой промышленности [5]. Неотъемлемой частью конструкций таких аппаратов являются трубные решетки, в которых закреплены кипяtilьные трубы, подогреваемые паром. Внутри этих труб циркулирует выпариваемый раствор.

Выпарные аппараты на предприятиях пищевой промышленности и других отраслей производства применяются для повышения концентрации исходных продуктов, обеспечения различных технологических процессов паром, дистиллятом [6-9].

В современных конструкциях дистилляторов вода испаряется, (конденсат) конденсируется на поверхности более холодного тела (конденсатора). При этом тепло, которое содержится в пару, передается используемому для отвода теплу в конденсаторе и выбрасывается из установки.

Принцип работы предлагаемого электрического дистиллятора основан на принципе «преобразования воды в пар – конденсация пара – получение дистиллята».

Особенностью электрических дистилляторов для пищевой промышленности является отсутствие предварительной химической (ионно-обменной) обработки воды. Это связано с тем, что в воде растворено определенное количество солей. Соли, растворенные в воде, делятся на две неравномерные группы – хорошо растворимые соли (Na, K и др.) и плохо растворимые соли (Ca, Mg). При вскипании воды повышается концентрации растворимых солей и плохо растворимых солей (соли «жесткости»), которые выпадая в осадок, образуют слой накипи, при этом ухудшается теплопроводность теплопередающих поверхностей и падает производительность аппарата. Концентрация хорошо растворимых солей тоже увеличивается, что в итоге ухудшает качество дистиллята.

Это происходит вследствие того, что пузырек пара, поднимаясь вверх, должен

преодолеть пленку поверхностного натяжения воды на границе раздела фаз, при разрыве пленки образуются множество микроскопических капелек: от 5 до 20% в зависимости от интенсивности кипения (отношение производительности пара к объему воды в испарителе). При концентрации капелек попадают в дистиллятор и чем больше в них концентраций солей, тем хуже качество дистиллята.

Для борьбы с солесодержанием и камнеобразованием в основном используется продувка испарителя. За счет удаления воды с повышенным солесодержанием освобожденное пространство заполняется свежей порцией воды. Количество продуваемой воды зависит от первоначального солесодержания питательной воды и объема испарителя. Эта величина расчетная и в принципе путем продувки поверхности накипи может быть сведена к минимуму. Недостаток такого способа – большая потеря тепловой энергии за счет удаления горячей воды.

Обсуждение и результаты

В конструкции разрабатываемого дистиллятора при работе с накипью можно воспользоваться способностью трубчатых электронагревательных элементов (ТЭНов) к самоочищению [10]. При этом по окончании работы аппарата необходимо сразу же выпустить горячую воду из испарителя и ополоснуть его холодной водой. Эти меры позволяют примерно в 2 раза увеличить период между принудительным и естественным очищением поверхности ТЭНов.

Дистиллятор состоит из вертикальной цилиндрической емкости 7 (рис. 1) условно разбитой по высоте на две части: нижнюю и верхнюю. Уровень воды, подаваемой в аппарат через патрубок ввода 5, должен автоматически поддерживаться, и быть не менее высоты ТЭНов плюс слой воды (не менее 20 мм) для предотвращения режима «сухого хода», то есть работы ТЭНов с не покрытой водой поверхностью.

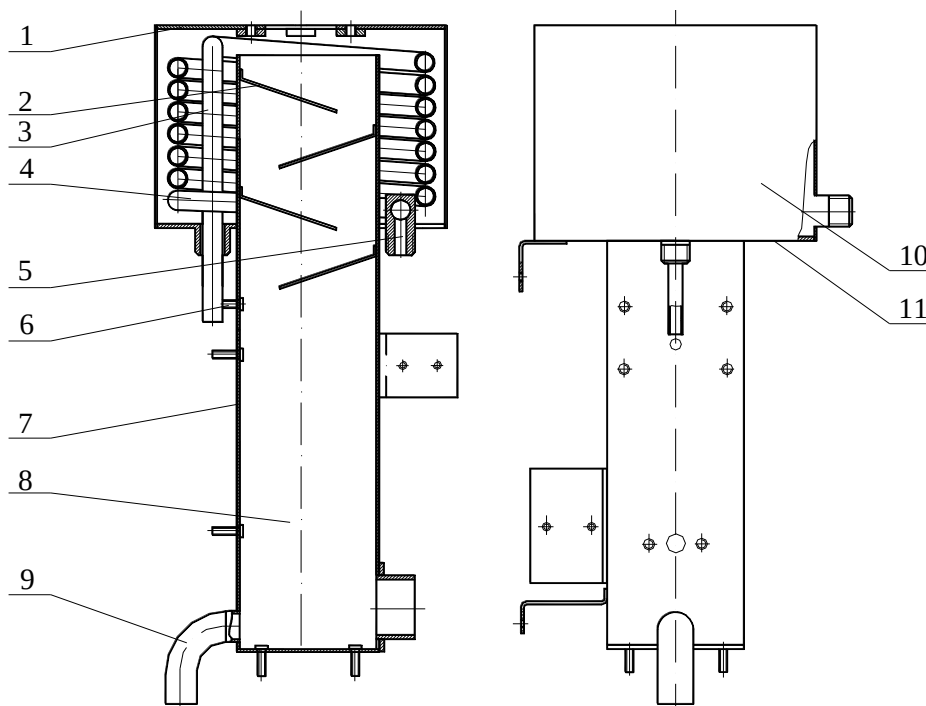


Рис. 1. Электрический дистиллятор с самоочищением нагревательных элементов:
1 – крышка верхняя; 2 – полки; 3 – трубка; 4 – змеевик; 5 – патрубок слива; 6 – верхнее отверстие; 7 – корпус; 8 – камера испарения; 9 – патрубок слива; 10 – питательная коробка; 11 – крышка нижняя

Верхняя паровая часть снабжена наклонными полками 2. За счет того, что промывание полки поток пара должен изменить направление почти на 180° возникающая центробежная сила прижимает капельку жидкости к стене испарителя, по которой капельная жидкость парового потока в виде пленки стекает обратно в испаритель. В верхней части цилиндрическая конденсационная емкость, плотно прикрыта верхней крышкой 1, предотвращая потери пара. В емкости расположен змеевик 4, внутри которого течет вода. На поверхности змеевика пар конденсируется в виде готового продукта и выносится через патрубок 5, соединенного с нижней крышкой 11 емкости.

Вода, протекающая внутри змеевика, нагревается согласно расчетам до 70°C и с этой температурой удаляется из аппарата через патрубок слива 9. Для того, чтобы не тратить тепловую энергию на нагрев питательной воды до 70°C предложена оригинальная конструкция питательной коробки 10. Питательная коробка имеет прямоуголь-

ную или цилиндрическую форму. Охлаждающая вода полностью смывается в питательную коробку. На диаметрально противоположных стенках просверлены два отверстия: нижнее отверстие 6 соединено трубкой 3 с испарительной емкостью и обеспечивает подачу воды, компенсируя влагу, которая выпаривается; верхнее отверстие обеспечивает сброс воды, поступающей в змеевик для конденсации пара.

При запуске аппарата вначале открывают кран подачи воды в змеевик. Уровень воды в камере испарения 8 соответствует уровню воды, сливаемой через верхнее отверстие. Когда дистиллятор выйдет на рабочий режим, уровень воды в дистилляторе понизится на 40 мм. Это обеспечивает не возможность выброса пара и горячей воды в питательную коробку. По сути питательная коробка, кроме поддержания уровня воды выполняет функцию гидрозатвора.

К основным достоинствам такого устройства относится отсутствие трущихся элементов и возможность подводить пита-

тельную воду под кромку зеркала испарителя, что свидетельствует о способности повышения степени сухости пара, а, следовательно, и к повышению качества дистиллята. Если рассмотреть процесс дистилляции с энергетической точки зрения, можно выявить следующую закономерность. Для кипения воды необходимо подвести пар с температурой выше, чем температура кипения. Например, если вода кипит при 100 °С, то температура греющего пара должна быть порядка 115 °С, что соответствует давлению 170 кПа. При этом получается вторичный пар с давлением 100 кПа и температурой 100 °С. В классической схеме этот пар направляется на конденсацию, где от него отбирается тепловая энергия равная по величине подведенной [11, 12].

Если вторичный пар не отводить на конденсацию, а направить его в компрессор, сжимая ее до давления 170 кПа (что соответствует параметрам первичного пара, поступающего в дистиллятор), вновь полученный первичный пар будет тратиться на испарение воды, а конденсат использоваться как дистиллят, то есть конечный продукт [13]. Другими словами, к месту подводимой энергии, равной энергии скрытой теплоты парообразования (2258 кДж/кг), необходимо подвести только энергию, необходимую для сжатия вторичного пара равную $i_{170} - i_{100} = 2700 - 2650 = 25$ кДж/кг, что в 90 раз меньше чем при классической схеме.

Если в однокорпусном аппарате вторичный пар отправить не в конденсатор на конденсацию, а предварительно подвергнуть небольшому сжатию в компрессоре (в результате чего давление пара и температура, соответствующая этому давлению, повысится), а в паровую рубашку, обогревающую аппарат, то пар повышенной температуры немедленно будет конденсироваться на относительно холодной поверхности рубашки. Тепло парообразования, выделяемое при этом, будет передаваться через стенку аппарата благодаря температурному перепаду, возникшему при сжатии пара жидкости в аппарате и паром в рубашке [14]. Таким образом, сжатый пар приобретает ценную способность раскрыть свои тепловые ресурсы и

отдать большое количество теплоты парообразования аппарату. При сжатии 1 кг насыщенного пара с температурой $t = 100^\circ\text{C}$ и давлением 1,033 ати до 1,5 ати пар перегревается. Без учета перегрева температура пара при 1,5 ати будет 110,7 °С.

В этом сжатом паре при перепаде температур от 110,7 °С до 100 °С можно отделить всю его температуру парообразования, причем пар превращается в конденсат с температурой 110,7 °С. Расход мощности l можно подсчитать по формуле:

$$l = \frac{1}{k-1}(p_o V_o - p_1 V_1), \text{ кДж}, \quad (1)$$

где $k = 1,3$ – коэффициент показателя политропы для сухого насыщенного пара; $V_o = 1,6946$ мкг – удельный объем начального пара при p_o ; $p_o = 10^5$ Па – начальное давление; $p_1 = 1,5 \cdot 10^5$ Па – давление пара после компрессии; $V_1 = 1,5971$ мкг – удельный объем пара после компрессии при p_1 .

$$l = \frac{1}{1,3-1}(10^5 \cdot 1,6946 - 1,5 \cdot 10^5 \cdot 1,5971) = 14,983 \text{ кДж}. \quad (2)$$

Тогда удельная теплота процесса q равна скрытой теплоте парообразования $r = 2251$ кД при p_o :

$$q = r, \text{ кДж/кг} \quad (3)$$

Тепловой коэффициент:

$$k_m = \frac{q}{l} = \frac{2251}{14,983} = 150. \quad (4)$$

То есть на каждый кДж энергии, затраченной на сжатие, можно получить 150 кДж, перешедших в результате сжатия пара в нагреваемую среду. В действительности эта операция не будет целесообразной, так как конденсат не охлаждается до 100 °С, а компрессор имеет КПД меньше единицы, вследствие чего работа l на сжатие почти удвоится. Тепловую энергию дал пар при подаче температуры пара на воду нового теплового уровня, тогда появляется возможность исключить из этого пара скрытую теплоту парообразования и превратить его в конденсат. Работа с малыми температурными переходами выгодна, но при этом же режиме по-

верхность нагрева аппарата будет составлять:

$$f = \frac{q}{f\Delta t}; \text{ если } \Delta t \rightarrow 0 \text{ то } f \rightarrow \infty \quad (5)$$

так, что польза достигается при бесконечных размерах установки. Поверхность при наличии малых пределов Δt увеличивается еще и потому, что коэффициент теплоотдачи со стороны жидкости зависит от Δt . Итак, оба множителя в знаменателе дроби $q/f\Delta t$ падают, что ведет к увеличению поверхности нагрева [15].

Таким образом, практически возможно достичь соотношения $k_0 \approx 75$, то есть на каждый кДж электроэнергии получить 75 кДж тепла.

Выводы

1. Предложена конструкция электрического дистиллятора, производительностью 15 л/ч, потребляемой мощностью 12 кВт с минимальной скоростью роста накипи.

2. Предложена оригинальная конструкция питающей камеры регулятора уровня воды, что позволяет уменьшить расходы охлаждающей воды на 10% и снизить потребляемую мощность на 11,6%.

3. Выполнены все необходимые тепловые расчеты, на основании которых проведена компоновки аппарата и определена его техническая характеристика.

4. Разработана технология уменьшения нарастания накипи за счет эффекта самоочищения.

Список литературы

1. Кук Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности. – М.: Пищепромиздат – 1978. – 342 с.
2. Федоткин И.М. Оптимизация выпарного оборудования / И.М. Федоткин. – К.: Техника, 1985. – 175 с.
3. Ильина Е.В. Малые предприятия по производству пива, безалкогольных напитков, спирта и ликероводочных изделий: Учеб. пособие для пищев. вузов. – М.: ДеЛи принт, 2006. – 128 с.
4. Кретов И.Т., Антипов С.Т., Шахов С.В. Инженерные расчеты технологического оборудования предприятий бродильной промышленности.

Учебное пособие для вузов. – М.: Колос, 2004. – 391 с.

5. Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. – М.: ДеЛи принт, 2004. – 328 с.
6. Бачурин П.Я., Смирнов В.А. Технология ликерно-водочного производства. – М., Пищевая промышленность, 1975. – 326 с.
7. Кук Г.А. Новые течения в технике молочной промышленности / Г.А. Кук. – Л.: Снабтехиздат. Ленингр. отд-ние, 1934. – 55 с.
8. Кук Г.А. Теория и расчет основного оборудования молочной промышленности / Г.А. Кук. – Л.: Снабтехиздат, 1934. – 409 с.
9. Крупин Г.В. Технологическое оборудование предприятий молочной промышленности: учебное пособие для институтов пищевой пром-ти / Г.В. Крупин, Н.Я. Лукьянов, Ф.М. Тарасов; под ред. Кука Г.А. – М.: Пищепромиздат, 1953. – 595 с.
10. Чернишов С.О. Отримання дистильованої води із використанням ефекту термоудару / С.О. Чернишов, Д.О. Єрьоменко, І.М. Лебедєв // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. – Донецьк: ДонНУЕТ, 2008. Вип. 18. – С. 218-223.
11. Єрьоменко Д.О. Енергосберегаюча технологія парокompresійної перегонки з додатковим джерелом тепла / Д.О. Єрьоменко, Н.І. Покинтеліца // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. по материалам междунар. конф. «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (11-15 сентября 2017 года). Вип. № 8. – Севастополь: СевГУ, 2017. – с. 29-33.
12. Колосков С.П. Подготовка воды в пищевой промышленности / С.П. Колосков. – М.: Пищепромиздат, 1979. – 430 с.
13. Чернышев С.А. Енергосберегаючий спосіб процесу перегонки / С.А. Чернышев, Д.О. Єрьоменко, І.Н. Лебедєв // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Випуск № 35, том 2. – Одеса, 2009. – С. 212-215.
14. Єрьоменко Д.О. Використання компресійної технології для отримання дистильованої води / Д.О. Єрьоменко, С.О. Чернишов, І.М. Лебедєв І.М. – Праці / Таврійський державний агротехнологічний університет – Вип. 10. Т.1 – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – с. 75-80.
15. Єрьоменко Д.О. Основи енергосбереження у галузі харчових виробництв / Д.О. Єрьоменко, І.М. Заплетніков. / Навч. посібник для студ. напр. підгот. 6.050503 “Машинобудування” спец. “Обладн. перероб. і харч. вир-в”. – Донецьк: [ДонНУЕТ], 2012. – 260 с.

References

1. Kuk G.A. Processes and equipment for the dairy industry. – M.: Pishchepromizdat – 1978. – 342 p.
2. Fedotkin I.M. Optimizatsiya vyparnogo oborudovaniya / I.M. Fedotkin. – K.: Tekhni-ka, 1985. - 175 s.
3. Ilyina E.V. The Small enterprises for the production of beer, soft drinks, alcohol and alcoholic beverages / E.V Ilyina // Proc. allowance for food. universities. – M: Delhi print, 2006. – 128 p.
4. Kretov I.T. Engineering calculations of technological equipment of enterprises for fermentation industry // I.T Kretov, S.T. Antipov, S.V Shakhov // Textbook for high schools. – M.: Kolos, 2004. – 391 p.
5. Ryabchikov B.E. Modern methods of water treatment for industrial and domestic use. – M: Delhi print, 2004. – 328 p.
6. Bachurin P.J. The technology distillery production / P.J. Bachurin, V.A. Smirnov. – M.: Food industry, 1975. – 326 p.
7. Kuk G.A. New trends in technology of the dairy industry/ G.A. Kuk. – L.: Snabtekh-izdat. Leningr. otd-nie, 1934. – 55 p.
8. Kuk G.A. Theory and calculation of the main equipment of the dairy industry / G.A. Kuk. – L.: Snabtekhizdat, 1934. – 409 p.
9. Krupin G.V. Technological equipment of enterprises of dairy industry: textbook for institutes of food industry/ G.V. Krupin, N.Ia. Luk'ianov, F.M. Tarasov; under the editorship of Kuk G.A. – M.: Pishchepromizdat, 1953. – 595 p.
10. CHernishov S.O. Otrimannya distil'ovanoi vodi iz vikoristannyam efektu termoudaru / S.O. CHernishov, D.O. Er'omenko, I.M. Lebedev // Obladnannya ta tekhnologii kharchovikh virobnitstv: Temat. zb. nauk. pr. – Donetsk: DonNUET, 2008. Vip. 18. – S. 218-223.
11. Eremenko D.O. EHnergosberegayushhaya tekhnologiya parokompressionnoj peregonki s dopolnitel'nym istochnikom tepla / D.O. Eryomenko, N.I. Pokintelitsa // Vestnik so-vremennykh tekhnologij: sb. nauch. tr. po ma-terialam mezhdunar. konf. «Sovremennye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologij obrabotki i oborudovaniya v mashino-stroenii» (11-15 sentyabrya 2017 goda). Vyp. № 8. – Sevastopol' : SevGU, 2017. – s. 29-33.
12. Koloskov S.P. Podgotovka vody v pishhevoj promyshlennosti / S.P. Koloskov. – M.: Pishchepromizdat, 1979. – 430 s.
13. Chernyshev S.A. Energy-saving way of distillation process / S.A. Chernyshev, D.O. Eremenko, I.N. Lebedev // Naukovi pratsi Odes'koï natsional'noi akademii kharchovikh tekhnologii. The issue No. 35, vol. 2. Odessa, 2009. – pp. 212-215.
14. Eremenko D.O. The use of compression technology to produce distilled water /D.O. Eremenko, S.O. Chernishov, I.M. Lebedev I.M. – Works / Tavria state agrotechnological University – N. 10. T.1 – Melitopol: TDATU, 2010. – p. 75-80.
15. Eremenko D.O. The basics of energy saving in the field of food production / D.O. Eremenko, I.M. Zapletnikov. / Textbook for stud. of direction of train. 6.050503 “Machine-building” spec. “Equipment of proc. and food industry”. – Donetsk : [DonNUET], 2012. – 260 p.

УДК 621.9

ВЫБОР ОСНАСТКИ ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

А.М. Иконников¹

¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрены основные критерии автоматизированного подбора оптимальной инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки деталей групповых технологических процессов. Для сокращения трудовых и материальных затрат, связанных с выбором инструмента, предложен алгоритм системы автоматизированного подбора инструментальной оснастки и описаны программные модули. В результате применения программы пользователю будет представлен отчет в виде спецификации на выбранную инструментальную оснастку с рассчитанными режимами резания, траекторией движения инструмента, техническим нормированием, ФСА-анализом операции и списком возможных альтернатив инструментальной оснастки с оценками предпочтения выбора по ряду критериев

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, групповой технологический процесс, инструментальная оснастка, технологическая подготовка производства (ТПП), системы автоматизированного проектирования (САПР), оборудование с ЧПУ.

SELECTION OF ACCESSORIES FOR MAGNETIC ABRASIVE TREATMENT OPERATIONS

А.М. Ikonnikov¹

¹Altai State Technical University. I.I. Polzunova, Barnaul, Russian Federation

Abstract

The main criteria of automated selection of optimal tooling for operations of magnetic abrasive processing of parts of group technological processes are considered in the article. To reduce the labor and material costs associated with the choice of tools, the algorithm of the system of automated selection of tooling is proposed and software modules are described. As a result of application of the program, the user will be presented with a report in the form of a specification for the selected tool rig with calculated cutting modes, tool path, technical standardization, FSA analysis of the operation, and a list of possible alternatives to tooling with preference evaluations for a number of criteria.

Keywords: magnetic-abrasive processing, group technological process, tooling, technological preparation of production (CCI), computer-aided design (CAD), CNC equipment.

Введение

Требования по совершенствованию и сокращению сроков ТПП вызвали необходимость увеличения применения автоматизированного оборудования, станков с ЧПУ, высокопроизводительного инструмента, информационного и программного обеспечения, систем автоматизированного проектирования (САПР) и выбора режущего инструмента.

Современное металлорежущее оборудование с ЧПУ обеспечивает требуемую экономическую эффективность изготовления деталей при одновременном выполнении двух технологических условий – максимальной производительности и заданной точности обработки. Выбор режущего инструмента и инструментальной оснастки является важнейшим элементом, влияющим на реализацию указанных условий.

Существующие базы данных и экспертные системы выбора инструмента разработаны для конкретных производственных

условий, и не позволяют сравнить между собой однотипные конструкции различных производителей и изменить критерии выбора оптимальных вариантов конструкций оснастки [1-3].

Оптимальный выбор инструментальной оснастки является очень важной и сложной задачей, так как ее неправильный выбор может не только привести к неудовлетворительной обработке, но и к ее поломке, срыву сроков производства и т.д. На сегодняшний день проблема выбора инструмента получает все большую актуальность вследствие увеличения доли мелкосерийного производства в общем объеме машиностроения. В мелкосерийном и серийном производстве широко используется групповая технология, позволяющая повысить коэффициент закрепления операций и создать условия производства, близкие к крупносерийному и массовому.

Групповая обработка деталей основана на объединении деталей в группы, для каждой из которых применимы однородные технологические операции и общая быстро переналаживаемая технологическая оснастка. Данная технология позволяет повысить производительность обработки, сократить себестоимость технологической оснастки и срок технологической подготовки производства [4, 5].

Повышению эффективности автоматизированной разработки ТП во многом способствует рациональное сочетание высокопроизводительных групповых технологических процессов с прогрессивными технологиями финишной обработки, к которым относится магнитно-абразивная обработка (МАО). Сущность МАО состоит в абразивном воздействии на обрабатываемую деталь порошковой ферромагнитной абразивной массы, уплотненной энергией магнитного поля [8-10].

Выбор оснастки для операции магнитно-абразивной обработки

В качестве объекта исследования в настоящей работе выбран процесс подбора оптимальной инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей

изделий группового технологического процесса на оборудовании с ЧПУ. Выбор осуществляется на основе данных, полученных из геометрических моделей группы деталей, представляемых в виде 2D-чертежей или 3D-моделей, с последующей передачей спецификации на выбранную оснастку в САМ-систему и САПР ТП [6-7].

Для решения указанных проблем авторами разрабатывается автоматизированная система, позволяющая на основе 3D-модели изделия и технологической информации (материал и твердость заготовки, размерные допуски, шероховатость поверхностей) автоматически формировать, ранжировать и выбирать различные варианты структурных компоновок инструментальной оснастки в зависимости от ряда критериев, рассчитывать оптимальные режимы резания. На рисунке 1 приведена блок-схема алгоритма выбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки деталей группового технологического процесса.

Разрабатываемый программный комплекс включает следующие модули:

- ✓ Подсистема загрузки и интерпретации чертежей в 3D-модели;
- ✓ Подсистема проектирования комплексной детали группы;
- ✓ Подсистема декомпозиции комплексной детали на КТЭФ;
- ✓ Подсистема подбора вариантов инструментальной оснастки на основе критериев и технических требований;
- ✓ Подсистема поиска оптимальной инструментальной оснастки и альтернативных вариантов на основе критериев оптимизации;
- ✓ Подсистема выбора оптимального вида магнитно-абразивного порошка и смазочно-охлаждающей жидкости согласно техническим требованиям;
- ✓ Подсистема выбора и расчета траектории обработки;
- ✓ Подсистема расчета режимов резания;
- ✓ Подсистема технического нормирования операции;
- ✓ Подсистема функционально-стоимостного анализа (ФСА) операции;

- ✓ Подсистема интеграции с CAD/CAM-системами.

Можно выделить ряд основных критериев, влияющих на выбор магнитного индуктора (МИ), магнитно-абразивного порошка (МАП) смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ):

- ✓ тип операции;
- ✓ характер магнитного поля;
- ✓ форма рабочей поверхности МИ;
- ✓ конструктивно-геометрические параметры МИ;
- ✓ расположение магнитов и магнитопроводов;
- ✓ размер, вид и точность заготовки;
- ✓ состояние поверхностного слоя заготовки;
- ✓ свойства обрабатываемого материала;
- ✓ профиль обрабатываемой поверхности;
- ✓ величина рабочего зазора;
- ✓ кинематика процесса обработки;
- ✓ технологические особенности оборудования;
- ✓ требования по качеству поверхности обрабатываемой детали;
- ✓ траектория движения инструмента;
- ✓ условия обработки;
- ✓ структура зерен магнитно-абразивного порошка;
- ✓ физико-механические и геометрические характеристики МАП;
- ✓ возможность применения и химический состав СОЖ;
- ✓ другие параметры инструментальной оснастки для МАО.

Исходными данными для программного обеспечения являются 2D-чертежи или 3D-модели обрабатываемых деталей, представленные в формате IGES. Подсистема загрузки модели и чертежа детали предназначена для процедуры ввода данных о детали. Геометрической информации о детали недостаточно для определения инструмента, поэтому в модуле чтения IGES интерпрети-

руются технические требования с рабочего чертежа: материал, твердость заготовки, размерные допуски, шероховатость поверхностей.

Подсистема проектирования комплексной детали группы на основе конструктивно-технологических признаков выбирает деталь, содержащую в своей конструкции все элементы (поверхности) деталей, входящих в группу. В случае, когда такая деталь отсутствует, система искусственно проектирует комплексную деталь, содержащую все основные элементы группы деталей.

Подсистема структурной декомпозиции разбивает 3D-модель комплексной детали на КТЭФ (конструкторско-технологические элементы формы) и записывает это представление в единую базу данных системы. Примерами КТЭФ являются фаска, цилиндрическая поверхность, канавка и т.д. Информация о КТЭФ включает в себя совокупность параметров, однозначно определяющих форму, размеры, шероховатость поверхности, отклонения от ее правильной формы, физико-механические свойства.

В подсистеме подбора инструментальной оснастки организовано распознавание КТЭФ, автоматизированное определение типа операции, вида обработки, используемой заготовки и ее состояния. На основе данных о материале заготовки, твердости и качестве исходной поверхности, а также о качестве заготовки и детали определяется число проходов магнитно-абразивной обработки.

В главном окне приложения будут выведены вкладки с различными представлениями детали (3D-модель комплексной детали, по деталям группы, по КТЭФ, видам обработки), отображаться технологическая информация.

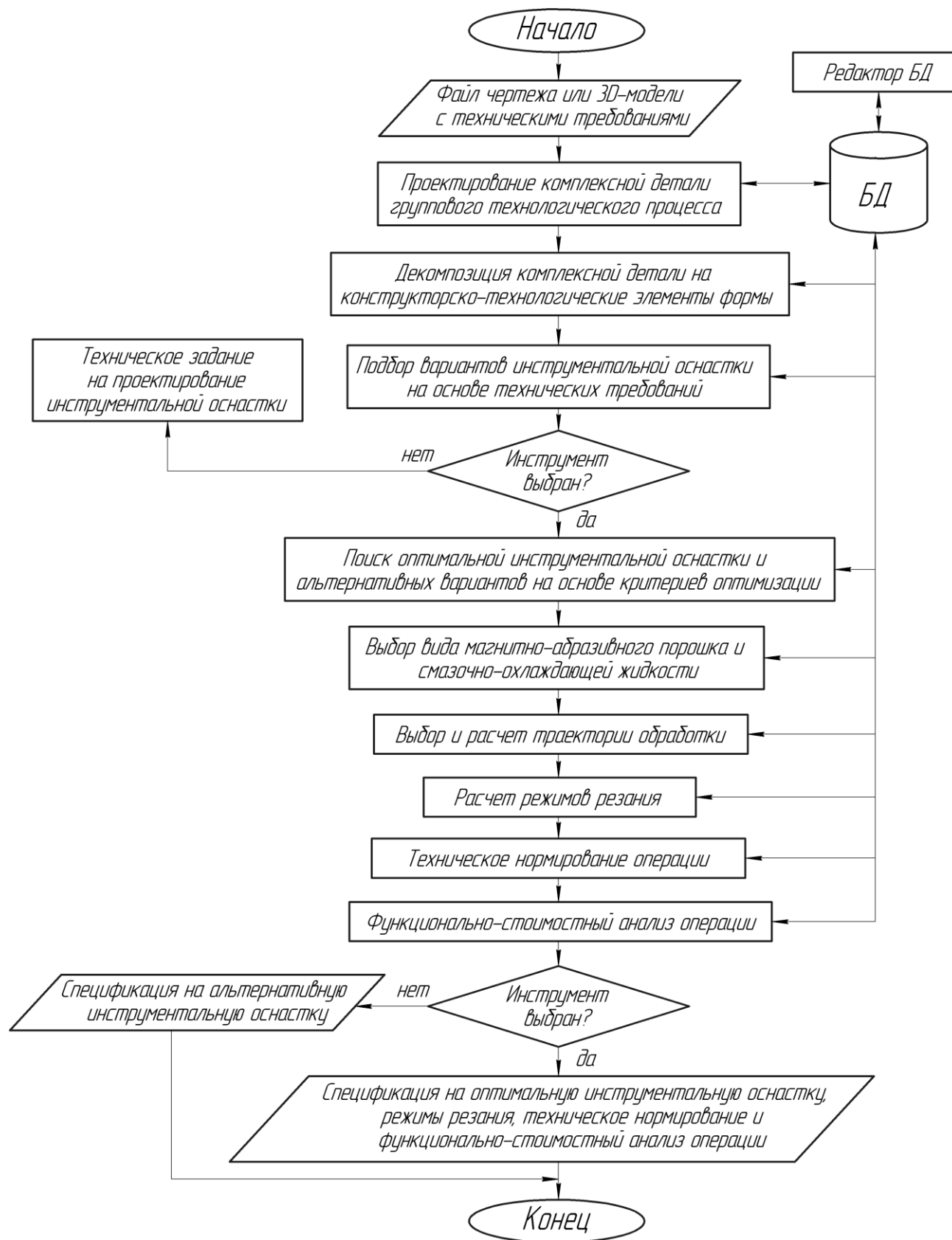


Рис.1. Блок-схема алгоритма выбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки деталей группового технологического процесса

С учетом технологической информации о детали в подсистеме подбора вариантов инструментальной оснастки выбираются конструктивно-геометрические параметры магнитных индукторов и кинематика процесса абразивной обработки, которые влияют на постоянство величины рабочего зазора и способность обеспечивать определенную шероховатость поверхности.

На следующем этапе методом решения задачи многокритериального выбора определяется оптимальный вариант магнитного индуктора. Многокритериальная задача поиска наилучшей инструментальной оснастки включает выбор критериев оптимизации, которые пользователь определяет и ранжирует по приоритету согласно целевой функции поиска. Критериями поиска оптимального решения могут быть стоимость, производитель, универсальность конструкции, возможность быстрой переналадки и др.

В подсистеме выбора оптимального магнитно-абразивного порошка и смазочно-охлаждающей жидкости в зависимости от вида обработки определяются физико-механические и геометрические характеристик МАП (форма, состав, структура, зернистость, стойкость, режущая способность, магнитная проницаемость зерен порошка) и рекомендуемый химический состав СОЖ в зависимости от материала и состоянии заготовки, условий обработки, типа операции и технологических возможностей оборудования.

Одним из основных критериев выбора на каждом этапе является экономичность обработки, которая определяется стоимостью инструмента, его стойкостью, взаимозаменяемостью, стоимостью машинного времени и другими экономическими критериями, которые рассматриваются в разрезе подсистемы ФСА-анализа. Разрабатываемая автоматизированная система предоставляет расширяемую библиотеку современного оборудования. В итоге пользователю представляется отчет в виде спецификации на выбранную инструментальную оснастку с рассчитанными режимами резания, траекторией движения инструмента, техническим нормированием и ФСА-анализом операций.

Также отчет содержит список возможных альтернатив инструментальной оснастки с оценками предпочтения выбора по разным критериям.

Автоматизированная система выбора включает в себя базу данных конструкторско-технологических элементов, инструментальной оснастки, магнитно-абразивных порошков и смазочно-охлаждающих жидкостей, систем закрепления, режимов резания, норм времени на обработку и др. на основе разработанных авторами таблиц и классификации индукторов и специализированных приспособлений для магнитно-абразивной обработки. Для наполнения и поддержания базы данных в актуальном состоянии был разработан редактор базы данных, предоставляющий пользователю удобный интерфейс для просмотра и изменения информации, хранящейся в базе данных.

Выводы

Применение создаваемой автоматизированной системы подбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки изделий группового технологического процесса будет возможно при использовании, как всего функционала, так и отдельных модулей.

В результате применения программы пользователю будет представлен отчет в виде спецификации на выбранную инструментальную оснастку с рассчитанными режимами резания, траекторией движения инструмента, техническим нормированием, ФСА-анализом операции и списком альтернатив инструментальной оснастки с оценками предпочтения выбора по критериям.

Список литературы

1. Аверченков В.И., Аверченков А.В., Терехов М.В., Кукло Е.Ю. Автоматизация выбора режущего инструмента для токарных станков с ЧПУ: монография. М.: ФЛИНТА, 2011. 151 с.
2. Аверченков, В.И., САПР технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов: учеб. пособие для вузов / В.И. Аверченков, И.А. Каштальян, А.П. Пархутик. – М. Высш. шк., 1993 – 288 с.

3. Антонюк, В.С., Автоматизация проектирования технологических процессов /В.С. Антонюк, С.А. Вислоух, В.И. Аверченков. – Киев: УМК ВО, 1989. – 116 с.
4. Иконников, А.М. Совершенствование технологии изготовления прецизионных деталей топливной аппаратуры применением метода магнитно-абразивной обработки [Текст] / А.М. Иконников, Е.Ю. Татаркин // Вестник алтайской науки. – 2013. – № 2 - 1. – С. 7 – 8.
5. Татаркин, Е.Ю. Автоматизация выбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей [Текст] / Е.Ю. Татаркин, А.М. Иконников, Т.А. Шрайнер // Инновации в машиностроении: тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – С. 196-201.
6. Татаркин, Е.Ю. Функционально-стоимостный анализ технологических процессов изготовления деталей [Текст] / Е.Ю. Татаркин, А.М. Иконников // Инновации в машиностроении: тр. 4-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: Изд-во: НГТУ, – 2013г. – С. 386-387.
7. Торлин, В. Н. Финишные операции в гибком автоматизированном производстве / В. Н. Торлин, А. С. Баталин. – Киев: Техника, 1987. – 208 с.
8. Филонов, И.П. Проектирование технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие для вузов/ И.П. Филонов, В.И. Аверченков, Л.М. Кожуро [и др.]; под общ. ред. И.П. Филонова. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 910 с.
9. Хомич, Н.С. Перспективные области применения абразивной обработки в магнитном поле. - Мн.; БелНИИТИ, 1984. - 40 с
10. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография. - Мн.: БНТУ, 2006. - 218 с.
1. Averchenkov VI, Averchenkov AV, Terekhov MV, Kuklo E.Yu. Automation of selection of cutting tools for CNC lathes: monograph. Moscow: Flint, 2011. 151 p.
2. Averchenkov, VI, CAD of technological processes, devices and cutting tools: Textbook. allowance for universities / V.I. Averchenkov, I.A. Kashtalyan, A.P. Parhutik.- M. Higher education. Sc., 1993 - 288 p.
3. Antonyuk, VS, Automation of the design of technological processes / V.S. Antonyuk, S.A. Wislow, V.I. Averchenkov. - Kiev: UMC VO, 1989. - 116 p.
4. Ikonnikov, A.M. Perfection of the technology of manufacturing precision parts of fuel equipment using the method of magnetic abrasive processing [Text] / A.M. Ikonnikov, E.Yu. Tatarkin // Bulletin of the Altai science. - 2013. - No. 2 - 1. - P. 7 - 8.
5. Tatarkin, E.Yu. Automation of choice of tooling for operations of magnetic abrasive processing of complex surfaces [Text] / E.Yu. Tatarkin, A.M. Ikonnikov, T.A. Schreiner // Innovations in Mechanical Engineering: Tr. VII Intern. scientific-practical. Conf. - Kemerovo: KuzGTU, 2015. - C. 196-201.
6. Tatarkin, E.Yu. Functional-cost analysis of technological processes of manufacturing parts [Text] / E.Yu. Tatarkin, A.M. Ikonnikov // Innovations in Mechanical Engineering: Tr. 4th Intern. scientific-practical. Conf. - Novosibirsk: Publishing House: NSTU, - 2013г. - P. 386-387.
7. Torlin, VN Finishing operations in flexible automated production / VN Torlin, AS Batalin. - Kiev: Technique, 1987. - 208 p.
8. Filonov, I.P. Designing of technological processes in mechanical engineering: training. manual for universities / I.P. Filonov, V.I. Averchenkov, LM Kozhuro [and others]; under the Society. Ed. I.P. Filonov. -Minsk: UE "Technoprint", 2003. - 910 p.
9. Khomich, N.S. Perspective areas of application of abrasive processing in a magnetic field. - Mr.; BelNIINTI, 1984. - 40 s
10. Khomich N.S. Magnetic abrasive processing of products: monograph. - Mn.: BNTU, 2006. - 218 p

References

УДК 621.923

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОМПЛЕКСНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.А. Черепашков¹, П.А. Самойлов²¹ Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара, Российская Федерация² АСКОН-Самара ООО, г. Самара, Российская Федерация

Аннотация

В статье обсуждается проблема выбора критерия эффективности при построении динамических моделей, необходимых для организации управления процессами проектирования и эксплуатации интегрированных автоматизированных систем проектирования в машиностроении. Приводятся результаты сравнения аналитических и экспериментальных графиков динамики интегрального критерия в комплексных проектах.

Ключевые слова: динамическая модель, интегрированные системы, интегральный критерий.

MODELING AND ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF DYNAMIC MODELS OF INTEGRATED AUTOMATED SYSTEMS OF MACHINE-BUILDING MANUFACTURE

A.A. Cherepashkov¹, P.A. Samoilov²¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation² ASKON-Samara LLC, Samara, Russian Federation

Abstract

The article discusses the problem of choosing an efficiency criterion for constructing dynamic models necessary for organizing the management of the design and operation of integrated auto-matized design systems in engineering. The results of comparison of analytical and experimental graphs of integral criterion dynamics in complex projects are presented.

Keywords: dynamic model, integrated systems, integral criterion.

Введение

В индустриально развитых странах переход на новый экономический уклад связывают с массовым внедрением информационных технологий. При этом парадигма «Цифровой экономики» затрагивает практически все аспекты жизни общества, включая и материальное производство. В промышленности, в том числе и в машиностроении, процесс информатизации проявляется в активном создании на предприятиях комплексных автоматизированных систем, в информационную среду которые интегрируются средства автоматизации проектирования (CAD/CAM/CAE...CA³x”– технологии и системы) и управления жизненным циклом

изделий (CALS/PLM – технологии и системы) [1].

Разработка и внедрение программно-методических комплексов и систем промышленного назначения, как правило, реализуется коммерческими компаниями (фирмы – интеграторы автоматизированных систем), специализирующимися в автоматизации определенных отраслей производства [2]. При комплексировании создаваемой на предприятии автоматизированной системы профессиональные интеграторы оперируют компонентами готового к использованию прикладного программного обеспечения (Commercial Of The Shelf – COTS) от ведущих производителей САПР [3]. А также опираются на отработанные методики реин-

жиниринга процессов проектирования и производства, необходимые для успешного внедрения и эксплуатации сложного программного обеспечения промышленного назначения.

В последние годы в мировой индустрии САПР наметились существенные изменения в методологии создания комплексных систем [4]. Все чаще, даже на малых и средних предприятиях, отказываются от так называемых «коробочных» (типовых) продуктов в пользу заказных разработок. В таких, адаптированных к требованиям заказчика решениях, называемых «кастомизированными» (customized), применяется оригинальное или существенно доработанное прикладное программное обеспечение (bespoke software) [5]. Для автоматизации организационно-технического планирования и диспетчеризации машиностроительных производств преимущественно стали использовать не только (и не столько) функционал универсальных автоматизированных систем управления (ERP), а специальные программные продукты, называемые MES (Manufacturing Execution System). Причем разработку и интеграцию MES в комплексных системах выполняют специалисты компаний специализирующиеся в области автоматизации именно машиностроительного проектирования. Как, например, система «Гольфстрим» от ведущего российского производителя САПР - компании АСКОН [3].

В соответствии с используемой интеграторами методологией разработки и внедрения автоматизированных систем строятся функциональные модели, отражающие различные аспекты производственных и общесистемных процессов. Традиционные подходы, рекомендованные стандартами IDEF, наряду с определенными достоинствами (графическая нотация, возможность отображения не только последовательности работ, но и механизмов их исполнения, модульность и пр.) [1], обладают целым рядом несовершенств [2].

К числу проблем, усложняющих практическое применение известных языков функционального моделирования, относятся трудоёмкость составления диаграмм, слож-

ность их прочтения и анализа и пр. Основным ограничением представляется статичность моделей, в которых недостаточно полно и наглядно отражается динамика развития процессов функционирования системы. Поэтому практикующие специалисты статические диаграммы функциональных моделей часто дополняют графиками и диаграммами, визуализирующими развитие процессов во времени. Широкую известность приобрели универсальные диаграммы Ганта и сетевые графики [1], используемые при планировании и организации производства. Для оперативного управления проектными и внедренческими работами также применяются специфические (предметно-ориентированные) графики, отражающие динамику развития проектов по некому критерию, характерному для определённой предметной области. Например, при анализе динамики конструкторского проектирования в качестве основного показателя может быть использован суммарный объем проектных документов, разработанных конструкторами на текущий период времени. Или в графической форме отображается количество изменений, вносимых в комплект проектной документации во время возвратных циклов, характерных для проектирования многих технических объектов. В данном случае процесс достаточно точно вписывается в классический граф затухающего колебательного процесса [6].

Практические аспекты применения динамических моделей для оценки эффективности процессов автоматизированного проектирования

Предметно-ориентированные критерии дают хорошие результаты на отдельных этапах жизненного цикла изделий. Однако для комплексных проектов, включающих целый ряд различных по своему содержанию этапов, локальные критерии эффективности в динамических моделях не подходят, и встает проблема с выбором некоего интегрального показателя (индикатора) отражающего процесс функционирования комплексной организационно-технической системы [2,6].

При проектировании и развёртывании комплексных автоматизированных систем промышленного назначения (PLM - систем) компаниями-интеграторами выполняется достаточно сложная последовательность работ, включающая множество разнообразных по своему содержанию этапов [1,2]. Начиная от создания концепции, разработки средств обеспечения, вплоть до обучения персонала и опытной эксплуатации системы. Поэтому для интегральной оценки работ, по созданию и внедрению автоматизированных систем авторами предложено использовать такой критерий как трудоёмкость исполненных проектных процедур.

Самым очевидным и простым для построения динамической модели автоматизированного проектирования представляется двумерный график, горизонтальная ось которого размечена календарными датами, а по другой оси нарастающим итогом откладывается суммарная трудоёмкость выполненных работ (T - затраченное всеми исполнителями на данный период время) (рис. 1,а). Несомненным достоинством такой модели является использование реального времени (календарных дат и хронометража работы исполнителей).

Однако можно возразить, что такой подход содержит скрытую неопределённость в оценке трудоёмкости различных этапов, которые могут существенно отличаться по сложности и характеру работ. При хронометраже не учитывается интенсивность труда, которая существенно варьируется в различных стадиях проекта. В длительных проектах из-за организационных, финансовых и многих других причин могут выпадать значительные временные интервалы, в течение которых разработки ведутся частично, или даже совсем прекращаются. Напротив, в проектных коллективах достаточно часто отмечаются периоды интенсивного труда, в процессе которых за относительно короткий календарный период выполняется большой объем работ.

Следует особо отметить, что временные затраты, фиксируемые хронометражем, при выполнении творческой работы, к которой несомненно относится инженерное проекти-

рование, также мало информативны, поскольку в значительной мере зависят от квалификации исполнителей.

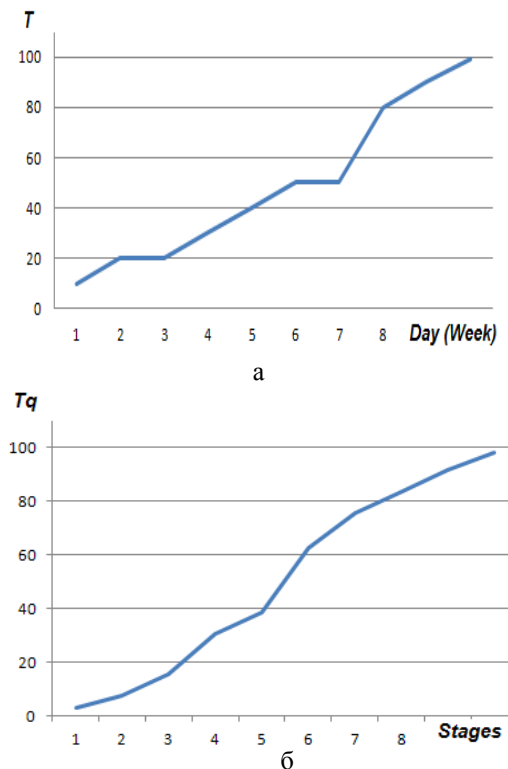


Рис. 1 Графики, отражающие динамику проектных работ: а) в реальном масштабе времени; б) – по этапам, с учетом эффективной трудоемкости проектирования

В обсуждаемой методике для расчетов интегрального критерия эффективности инженерных работ, которые трудно формализовать, предлагается использовать экспертный подход. То есть необходимо корректировать реальное время исполнения работ на различных этапах (или выполненных различными по квалификации исполнителями), коэффициентами, отражающими интенсивность труда и квалификацию исполнителей. Несмотря на кажущую субъективность в практике трудового нормирования экспертные оценки применяются чрезвычайно часто и при этом дают достаточно стабильные и точные результаты в определенной профессиональной среде. Замечено, что в процессе многолетней деятельности в конкурентной среде специализированных субъектов (к которым относятся и компании интеграторы) экспертные оценки трудоемкости типовых работ нивелируются как в абсолютном, так и

относительном выражении [2]. Кроме того, в коммерческих компаниях хорошо налажен учет всех оплачиваемых работ. В организациях связанных с предоставлением услуг трудоемкость широко используется для расчетов стоимости работ. По суммарной трудоемкости в итоге оценивается и стоимость завершённого проекта.

В предлагаемой авторами методике моделирования по оси абсцисс размечаются не календарные даты, а этапы работ (рис. 1, б); по оси ординат, нарастающим итогом откладываются суммарные значения интегрального критерия, отражающего как объем произведённых исполнителями трудов затрат, так и их эффективность.

$$T_q = \sum_{i=1}^n (t \cdot q)_i, \quad (1)$$

где t – затраченное исполнителем (хронометрируемое) время, q – назначенные экспертами коэффициенты, учитывающие интенсивность и квалификацию труда специалистов, участвующих в работах на i – том этапе проекта. Назовем данный показатель эффективной трудоёмкостью проекта.

В идеализированном случае, когда предполагается, что все проектные процедуры вносят одинаковый вклад в формирование системы, траектория проектирования должна быть линейной, как показано на графике (рис 2, а). На графике показатель T_q нормирован в процентах от суммарной трудоёмкости проекта.

Изучение динамики развития реальных разработок комплексных систем [2] показывает, что эффективная трудоёмкость существенно меняется на различных стадиях проектных работ. На начальных этапах реинжиниринга бизнес процессов выполняется обследование предприятия, включающее хорошо формализованные процедуры сбора статистической информации, построение функциональных моделей и пр., не требующих материальных затрат и высококвалифицированного труда. На завершающих стадиях проектирования эффективный вклад в разработку проекта также замедляется, поскольку ресурсы проектировщиков, в основном, тратятся на рутинные процедуры

оформления принятых ранее проектных решений. Этим объясняется выпуклость («S»-образность) траектории разработки комплексного проекта. На (рис. 2, б) представлена «эталонная» траектория проектирования, которая может получиться, если регулярно и с неким высоким усреднением качеством ($q = 1$) будут выполняться все предусмотренные планом работы.

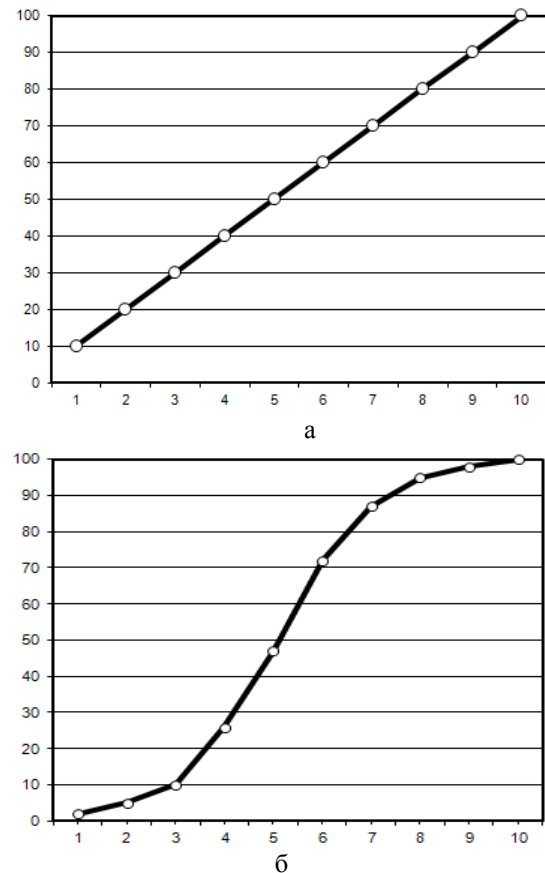


Рис. 2 Теоретические графики динамики проектных работ: а) линейный график; б) идеализированная «S» - образная кривая

Построение динамических траекторий достаточно убедительно демонстрирует основные закономерности развития процессов проектов внедрения. При помощи графоаналитического моделирования определенных аспектов деятельности компании, становится возможным достаточно точно и оперативно обнаруживать "узкие места" в управлении, оптимизировать общую схему бизнеса. Близость к эталонной кривой может служить интегральным критерием успешности (эффективности) развития проекта внедрения. В свою очередь нарушения плавности

или отклонение проектных траекторий от плановых свидетельствует о наличии проблем [6].

Выбор и использование аналитических графиков

На практике обсуждаемая функциональная зависимость задается табличным способом. Однако, для идеализированных (эталонных) «S»-образные кривых можно подобрать аналитические аналоги, в том числе и среди классических функций. Например «S»-образные кривые достаточно близко соответствуют графику обратной тригонометрической функции.

$$Y = \arctg(x). \quad (2)$$

Данная функция многозначна. График главного значения, соответствующего $Y \in [0, \pi]$, точка перегиба которого проходит через начало координат, а сама функция монотонно возрастает, а затем симметрично убывает в диапазоне $-\infty < x < +\infty$. Через главное значение функции можно выразить и другие подобные функции, добившись необходимого поставленной задачей идентификации соответствия (рис. 3).

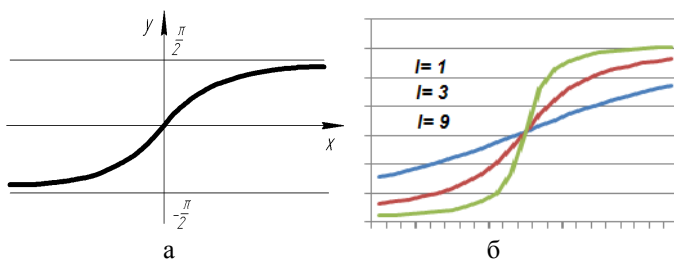


Рис. 3 Пример аналитических аналогов «S» - образных кривых: а) график главного значения функции; б) изменение интенсивности изгиба графика при помощи коэффициентов

На приведённых в статье аналитических графиках использовалось следующее соотношение, ограниченное интервалом, на котором функция монотонна:

$$Y = \arctg(x \cdot l) + k \cdot \pi, \quad (3)$$

где коэффициент k позволяет сдвигать график в правый верхний квадрант, чтобы все действительные значения функции были по-

ложительными, а коэффициент l позволяет регулировать интенсивность изгиба. На графике (рис. 3.б) приведен пример значений $-l < x < +l$; $l \in \{1, 3, 9\}$.

Выводы

На (рис. 4) показана аппликация аналитической «S» – образной кривой на реальные графики, отображающие динамику развития процесса создания разработки и внедрения PLM – систем в двух характерных проектах компании АСКОН-Самара [2,6], реализованных на промышленных предприятиях самарского региона.

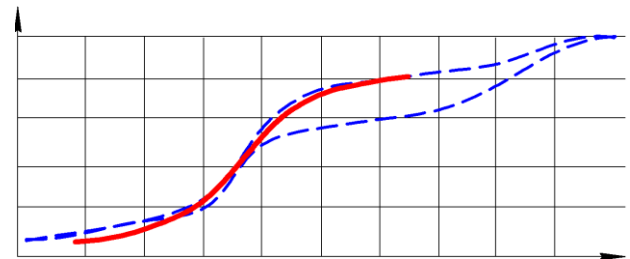


Рис. 4 Аналитическая кривая (сплошная линия), наложенная на реальные графики эффективной трудоемкости процесса разработки и внедрения PLM - системы (пунктирные линии)

В своей центральной части аналитическая кривая очень точно вписывается в график оптимального исполнения проекта. На второй кривой заметно отклонение от оптимальной траектории, что потребовало введение изменений в программу работ (ведение управляющего воздействия) которое в итоге привело к улучшению ключевых индикаторов проекта.

Список литературы

1. Computer technologies, modeling and automated systems in machine building: textbook / A.A. Cherepashkov, N.V.Nosov.– In-folio.– 2009.– 650 p.
2. Черепашков А.А., Самойлов П.А. Проблематика разработки и внедрения комплексных решений автоматизации технической подготовки машиностроительного производства // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии: матер. Всерос. науч.-практ. конф.– Оренбург: ОГУ, 2017. – с. 118 – 121.
3. АСКОН [Электронный ресурс]: Комплексные решения для машиностроения / Компания

- «АСКОН». – [Россия]. – URL: <http://ascon.ru/press/news/items/?news=2043> (10.10.17).
4. Transition metrics and revenue metrics offer alternative scenarios for Autodesk's fiscal year [Electronic resource]: News and Commentary for CAD and DCC Professionals / A Jon Peddie Research Publication, Inc. – [USA]. – URL: <http://gfxspeak.com/2016/02/26/autodesk-revenue-down-in-fourth-quarter-flat-for-fiscal-year/> (10.10.17).
 5. Bespoke Vs COTS [Electronic resource]: Blueberry Systems, Ltd. – [UK]. – URL: <http://www.blueberrysystems.co.uk/Resources/WhitePapers/BespokeVsCommercialOff-The-Shelf.aspx> (10.10.17).
 6. Черепашков А.А. Самойлов П.А. Применение графоаналитических моделей в задачах анализа процессов разработки и внедрения комплексных автоматизированных систем // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – Пенза, 2017. – № 2(22), – с. 268 - 278.
- ### References
1. Computer technologies, modeling and automated systems in machine building: textbook / A.A.Cherepashkov, N.V.Nosov. – In-folio. – 2009. – 650 p.
 2. Cherepashkov A.A., Samojlov P.A. Problematika razrabotki i vnedreniya kompleksnyh reshenij avtomatizacii tekhnicheskoy podgotovki mashinostroitel'nogo proizvodstva // Komp'yuternaya integraciya proizvodstva i IPI-tehnologii: mater. Vse-ros. nauch.-prakt. konf. – Orenburg: OGU, 2017. – s. 118 – 121.
 3. ASKON [Elektronnyj resurs]: Kompleksnye resheniya dlya mashinostroeniya / Kompaniya «ASKON». – [Rossiya]. – URL: <http://ascon.ru/press/news/items/?news=2043> (10.10.17).
 4. Transition metrics and revenue metrics offer alternative scenarios for Autodesk's fiscal year [Electronic resource]: News and Commentary for CAD and DCC Professionals / A Jon Peddie Research Publication, Inc. – [USA]. – URL: <http://gfxspeak.com/2016/02/26/autodesk-revenue-down-in-fourth-quarter-flat-for-fiscal-year/> (10.10.17).
 5. Bespoke Vs COTS [Electronic resource]: Blueberry Systems, Ltd. – [UK]. – URL: <http://www.blueberrysystems.co.uk/Resources/WhitePapers/BespokeVsCommercialOff-The-Shelf.aspx> (10.10.17).
 6. Cherepashkov A.A. Samojlov P.A. Primenenie grafoanaliticheskikh modelej v zadachah analiza processov razrabotki i vnedreniya kompleksnyh avtomatizirovannyh sistem // Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve. – Penza, 2017. – № 2(22), – s. 268 - 278.

УДК 621.9.047

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ НА ВИБРАЦИОННЫХ СТАНКАХ

Е.А. Левченко¹, Ю.В. Дейкун²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Исследован механизм формирования цинкового покрытия на деталях из углеродистых сталей в условиях вибрационной обработки и установлено, что для осуществления совмещенного процесса вибрационной обработки и нанесения цинкового покрытия на углеродистые стали необходима предварительная подготовка поверхности с целью ее активации и создания разности потенциалов на микрошероховатой поверхности для создания условий сцепления поверхностного слоя и цинкового порошка. Показано, что схватывание цинкового порошка поверхностью стали зависит от ее микротвердости, а также от соразмерности цинкового порошка и микрошероховатости поверхности.

Ключевые слова: микротвердость, микрошероховатость, виброобработка, покрытие, поверхностный слой.

USE OF THE MECHANOCHEMICAL METHOD OF PROCESSING OF STEELS ON VIBRATION MACHINES

E.A. Levchenko¹, Yu.V. Deykun²¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The mechanism of formation of a zinc coating on details of carbon steels under conditions of vibrating processing is investigated and it is established that for realization of the combined process of vibration treatment and application of a zinc coating on carbon steel, preliminary surface preparation is necessary in order to activate it and create a potential difference on a microrough surface to create bonding conditions surface layer and zinc powder. It is shown that the grasping of zinc powder by the steel surface depends on its microhardness, as well as on the proportionality of the zinc powder and the microroughness of the surface.

Keywords: microhardness, microroughness, vibroprocessing, coating, surface layer.

Вибрационные методы обработки широко применяются на очистных, шлифовально-полировальных операциях [1-3]. Совершенствование вибрационных методов осуществляется как за счет расширения теоретической и конструкторских баз, так и за счет создания новых разновидностей обработки с новыми технологическими возможностями.

Наиболее важные эксплуатационные свойства деталей машин – коррозионная стойкость, усталостная прочность, определяются состоянием поверхностного слоя, которые в ряде случаев требуют определенного покрытия. Вибрационная обработка довольно часто применяется при оксидировании, пассивировании, фосфатировании по-

верхностей. Имеются разовые, не систематические исследования применения вибрационной обработки для нанесения различных покрытий [4-6].

Качественная и количественная оценка эффективности процесса осаждения металла в условиях виброобработки проводилась по величине удельного съема металла, а также по величине потенциала зачищенного металла и скорости осаждения металла. Для этой цели использовались весовой анализ, рН-метрия, профилометрия, а также метод снятия поляризационных кривых в динамических условиях зачистки поверхности под слоем рабочего раствора.

С целью установления влияния состава рабочего раствора на потенциалы сталей 45,

3X13, X18H9 и 12X18H10T в статических условиях изучались электрохимические свойства различных марок сталей в растворах с различной концентрацией купрум (II) катионов на характер металлического покрытия в динамических условиях виброобработки [7].

Так как осаждение металла зависит от ряда факторов, то для получения адекватной оценки полученных результатов, исследования проводились в одинаковых технологических условиях: обработка осуществлялась на виброшлифовальном станке ВМИ-1003, объем контейнера – 25 л, объем загрузки – 2/3 объема контейнера; режим колебаний – амплитуда 3 мм; частота 42 Гц; объем исследуемого раствора – 1 л; время обработки – 1 час. В качестве абразивных гранул использовался бой шарошлифовальных кругов с карбидом кремния черный КЧ6 КВТ1-ЧТ грануляцией 25 – 30 мм. Исследуемые образцы были выполнены в виде цилиндров с общей обрабатываемой поверхностью – 1900 мм².

С целью изучения электродных потенциалов различных марок сталей при зачистке поверхностей абразивными гранулами под слоем электролита, были проведены исследования, по определению потенциала сталей в специально собранной в виброконтейнере ячейке [8].

Для изучения влияния структуры стали на характер медного покрытия были выбраны стали с ферритно-перлитной (сталь 45), перлитной (сталь 3X13), аустенитной (стали X18H9 и 12X18H10T) структурами. В качестве рабочих растворов использовался раствор 1% нитратной кислоты, раствор на основе минеральных кислот состава: 0,5% HCl + 1% HNO₃, как без добавок, так и с добавками солей меди различной концентрации.

Осаждение меди из рабочих растворов осуществляется только на стали 3X13, хотя уменьшение съема металла наблюдается также и у сталей X18H9 и 12X18H10T. Скорость осаждения меди на поверхности стали 3X13 из растворов хлоридов и нитратов меди увеличивается от 1 мг/см²·ч до 1,5 мг/см²·ч при увеличении концентрации купрум (II) ионов от 0,1% до 0,5%. Скорость осаждения

из сульфатных растворов меди уменьшается от 1,5 мг/см²·ч до 1,2 мг/см²·ч при увеличении концентрации купрум (II) ионов от 0,1% до 0,5% [9].

Для стали 45 купрум (II) ионы являются активаторами процесса растворения. В статических условиях и в динамических условиях виброобработки осуществляется процесс, приводящий к образованию медного покрытия по всей поверхности образца. Образующееся на большой скорости осаждения медное покрытие, характеризующееся крупнокристаллической структурой, непрочное удерживающееся на поверхности стали 45, которое легко удаляется при виброшлифовании. Влияние содержания купрума (II) сульфата на средний размер частиц меди приведено в (табл. 1).

Таблица 1
Влияние содержания купрума (II) сульфата на скорость осаждения и свойства медного покрытия на стали 45

Показатель процесса	Содержание CuSO ₄ , %		
	0,1	0,3	0,5
Средняя скорость осаждения, г/см ² ·ч	1,5	1,3	1,2
Средний размер частиц, мкм	90	82	79

С целью изучения электрохимических свойств различных марок сталей в рабочих растворах на основе минеральных кислот с различной концентрацией купрума (II) катионов на характер металлического покрытия в динамических условиях виброобработки, были сняты анодные и катодные поляризационные кривые.

На графиках (рис. 1-4) приведены анодные поляризационные кривые сталей 45 и 3X13 в растворах минеральных кислот без добавки и с добавкой купрум (II) катионов.

Из катодных поляризационных кривых стали 12X18H10T видно, что осаждение меди из кислых растворов ее соли происходит при потенциале -0,65В в статических условиях. В условиях виброобработки при зачистке защитной пленки шлифовальными зернами на поверхности стали образуются углубления. В углублениях, в результате значительного

замедления в доставке рабочего раствора, наступает его истощение.

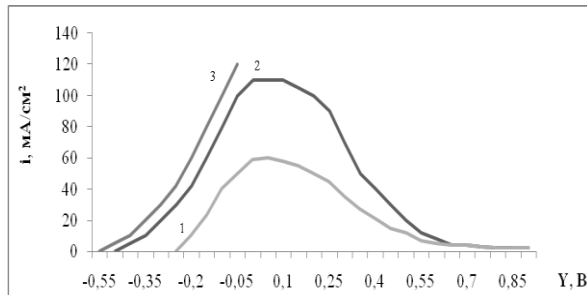


Рис. 1. Анодные поляризационные кривые стали 45: 1 - 1% HNO_3 ; 2 - HCl (0,5%) + HNO_3 (1%) в статических условиях; 3 - HCl (0,5%) + HNO_3 (1%) в динамических условиях виброобработки, режим: $A = 3\text{ мм}$; $f = 42\text{ Гц}$

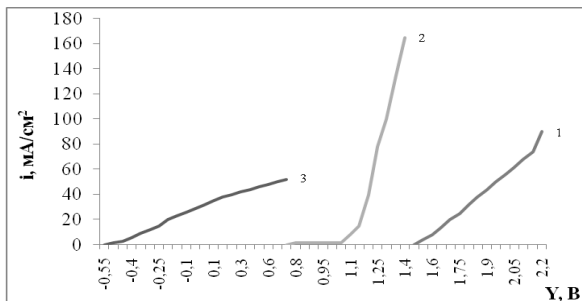


Рис. 2. Анодные поляризационные кривые стали 3X13: 1 - 1% HNO_3 ; 2 - HCl (0,5%) + HNO_3 (1%) в статических условиях; 3 - HCl (0,5%) + HNO_3 (1%) в динамических условиях виброобработки, режим: $A = 3\text{ мм}$; $f = 42\text{ Гц}$

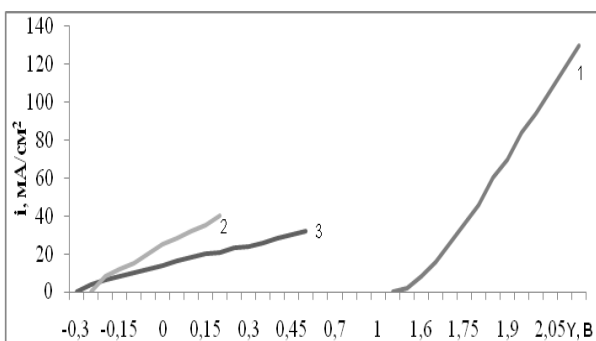


Рис. 3. Анодные поляризационные кривые стали X18H9: 1 - 1% HNO_3 ; 2 - HCl (0,5%) + HNO_3 (1%) в статических условиях; 3 - HCl (0,5%) + HNO_3 (1%) в динамических условиях виброобработки, режим: $A = 3\text{ мм}$; $f = 42\text{ Гц}$

Концентрация рабочего раствора на выступах больше, чем в углублениях. Область наиболее высокой плотности силовых линий тока сдвигается к углублениям, в результате здесь происходит повышенный катодный разряд и быстрый рост медного покрытия.

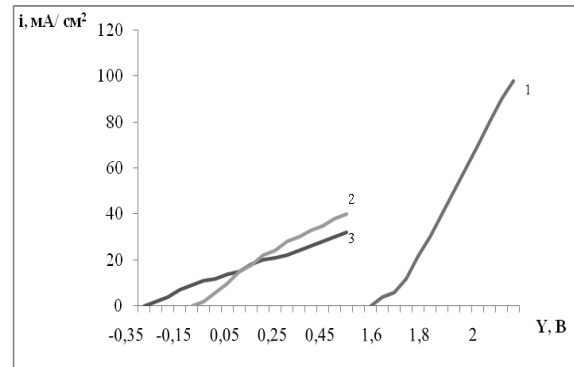


Рис. 4. Анодные поляризационные кривые стали 12X18H10T: 1 - 1% HNO_3 ; 2 - HCl (0,5%) + HNO_3 (1%) в статических условиях; 3 - HCl (0,5%) + HNO_3 (1%) в динамических условиях виброобработки, режим: $A = 3\text{ мм}$; $f = 42\text{ Гц}$

Так как большая часть поверхности пассивирована, то осаждение меди осуществляется только в углублениях, поэтому наблюдается минимальный прирост массы осадка. Известно, что медь может выделяться из сульфатных растворов в виде зерен поликристаллического осадка с текстурой преимущественных ориентаций граней (011), характеризующихся плотностью упаковки $4,02 \cdot 10^{15} \text{ V}_A^{-3/2}$. Так как V_A – атомный объем для различных сталей неодинаков, то плотность упаковки является также и функцией структуры стали.

О характере распределения медного осадка можно судить по изменению микрорельефа поверхности исследуемых сталей. В (табл. 2) приведены данные по влиянию купрум (II) катионов на формирование микрорельефа поверхности сталей при виброобработке в различных рабочих растворах.

Из (табл. 2) видно, что микрорельеф стали 45 ухудшается из-за образующихся растратов поверхности. Улучшение поверхности наблюдается в большей степени для стали 3X13, чем для нержавеющей сталей.

Установлено, что существует возможность осаждения меди на поверхности сталей 45, 3X13, X18H9 и 12X18H10T из кислых растворов хлоридов, нитратов, сульфатов меди без наложения внешнего тока в динамических условиях виброобработки.

Таблица 2
Влияние купрум (II) катионов на формирование
микро рельефа поверхности сталей при
виброобработке в 1% растворе HNO_3

Марка стали	Добавка, %	Cu^{+2}	
		Исходная шероховатость, мкм	Шерохова- тость после виброобра- ботки в течение 60 мин,
45	-	0,49	0,43
	0,15	0,47	0,55
	0,30	0,48	0,59
3X13	-	0,46	0,4
	0,15	0,48	0,38
	0,30	0,45	0,40
X18H9	-	0,45	0,4
	0,15	0,47	0,44
	0,30	0,46	0,43
12X18H10T	-	0,46	0,40
	0,15	0,48	0,47
	0,30	0,45	0,44

Скорость осаждения меди и характер металлического осадка зависит от химического состава и структуры стали. Максимальная скорость осаждения меди достигается на активированной поверхности стали 45 с ферритно-перлитной структурой. Увеличение содержания купрум (II)-катионов от 0,1 до 0,5 % в кислых растворах хлорида и нитрида меди приводит к увеличению скорости осаждения меди на стали 3X13 от 1 до 1,5 мг/см^2 ч, и к уменьшению скорости ее осаждения от 1,5 до 1,2 мг/см^2 ч из кислых сульфатных растворов меди. Осаждение меди на сталях X18H9 и 12X18H10T с аустенитной структурой затруднено из-за пассивации поверхности, зависит от скорости обновления поверхности, имеет минимальное значение в пределах от 0,01 до 0,1 мг/см^2 ч. Увеличением скорости осаждения меди от 1 до 1,5 мг/см^2 ч микрошероховатость стали 3X13 улучшается от 0,48 до 0,38 мкм, и незначительно изменяется от 0,45 до 0,4 мкм у нержавеющей сталей при увеличении содержания купрум (II)- катионов от 0,1 до 0,5% [10].

Выводы

В результате проведения исследований установлено, что существует возможность осаждения меди на поверхности сталей 45, 3X13, X18H9 и 12X18H10T из кислых растворов хлоридов, нитратов, сульфатов меди без наложения внешнего тока в динамических условиях виброобработки, режим: $A = 3\text{мм}$; $f = 42\text{ Гц}$. Скорость осаждения меди и характер металлического осадка зависит от химического состава и структуры стали. Максимальная скорость осаждения меди достигается на активированной поверхности стали 45 с ферритно-перлитной структурой.

Список литературы

1. Ворошнин, Л.Г. Теория и технология химико-термической обработки: учебное пособие/ Л. Г. Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. – М.: ООО Новое знание, 2010. – 304с.
2. Мухина, А.Е. Повышение декоративных свойств химически осажденного никеля / А.Е. Мухина, Г.М. Строгая, Т.Ф. Юдина // Современные электрохимические технологии в промышленности: Тезисы докладов IV международного научно-технического семинара, посвященного памяти Е.М. Румянцев. Иваново, 16-17 октября 2003. – с.153-156.
3. Мухина, А.Е. Химическое осаждение никеля с цинком, вольфрамом, молибденом и марганец: автореф. дис... канд. техн. Ивановский государственный химико-технологический университет - Иваново, 2008. – 16с.
4. Хранилов, Ю.П. Экология и гальванотехника: проблемы и решения [Текст] / Ю.П.Хранилов – Киров: изд. ВятГТУ. – 2000. – 97с.
5. Строгая, Т.М. Соосаждение никеля и цинка при химическом восстановлении гипохлоритом / Т.М. Строгая, Т.Ф. Юдина, А.Е.Мухина // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2006. – Т.39. - №9. – с. 94 – 98.
6. Любова, Н.А. Установка для нанесения цинковых покрытий вибро-термо-диффузионным методом / Н.А. Любова, Ю.П. Анкудимов // В кн.: Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология. Ростов-на-Дону, 1980. – с. 68 – 72.
7. Бабищев, А.П. Основы вибрационной технологии: Ч.1/ А.П.Бабищев – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1993. – 98с.
8. Бабищев, А.П. Теоретико-вероятностная модель процесса виброобработки плоской детали в случае эллиптических пятен контакта/ А.П. Бабищев, Н.Т. Мишняков // Прогрессивная отделочно-

упрочняющая технология. – Ростов-на-Дону. – 1981. – с. 8 – 10.

9. Бурштейн И.Е. Объемная вибрационная обработка / И.Е. Бурштейн, В.В. Балицкий, А.Ф. Духовский - М.: Машиностроение, 1981. – 52 с.
10. Левенгарц, В.П. Исследование динамики и совершенствование устройств для вибрационной обработки деталей: автореф. дис...канд.тех.наук / В.А. Левенгарц - Казань, 1981. – 28с.

References

1. Voroshnin, L.G. Teoriya i tekhnologiya himikotermicheskoy obrabotki: uchebnoe posobie/ L. G. Voroshnin, O. L. Mendeleva, V. A. Smetkin. – М.: ООО Novoe znanie, 2010. – 304s.
2. Muhina, A.E. Povyshenie dekorativnykh svoystv himicheskikh osazhdennoy nikelya / A.E. Muhina, G.M. Strogaya, T.F. Yudina // Sovremennye elektrohimicheskie tekhnologii v promyshlennosti: Tezisy dokladov IV mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar, posvyashchennogo pamyati E.M. Rumyantseva. Ivanovo, 16-17 oktyabrya 2003. – s.153-156.
3. Muhina, A.E. Himicheskoe osazhdenie nikelya s cinkom, vol'framom, molibdenom i marganec: avtoref. dis... kand. tekhn. Ivanovskiy gosudarstvennyy himiko-tekhnologicheskij universitet - Ivanovo, 2008. – 16s.
4. Hranilov, Yu.P. Ekologiya i gal'vanotekhnika: problemy i resheniya [Tekst] / Yu.P.Hranilov – Kirov: izd. VyatGTU. – 2000. – 97s.
5. Strogaya, T.M. Soosazhdenie nikelya i cinka pri himicheskom vosstanovlenii gipofosfitom / T.M. Strogaya, T.F. Yudina, A.E.Muhina // Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2006. – T.39. - №9. – s. 94 – 98.
6. Lyubova, N.A. Ustanovka dlya naneseniya cinkovykh pokrytij vibro-termo-diffuzionnym metodom / N.A. Lyubova, Yu.P. Ankudimov // V kn.: Progressivnaya otdelочно-упрочняющая технология. Rostov-na-Donu, 1980. – s. 68 – 72.
7. Babichev, A.P. Osnovy vibratsionnoy tekhnologii: Ch.1/ A.P. Babichev – Rostov-na-Donu: DGTU, 1993. – 98s.
8. Babichev, A.P. Teoretiko-veroyatnostnaya model' processa vibroobrabotki ploskoy detali v sluchae ellipticheskikh pyaten kontakta/ A.P. Babichev, N.T. Mishnyakov // Progressivnaya otdelочно-упрочняющая технология. – Rostov-na-Donu. – 1981. – s. 8 – 10.
9. Burshteyn I.E. Ob"emnaya vibratsionnaya obrabotka / I.E. Burshteyn, V.V. Balickij, A.F. Duhovskij - М.: Mashinostroyeniye, 1981. – 52 s.
10. Levengarc, V.P. Issledovanie dinamiki i sovershenstvovanie ustroystv dlya vibratsionnoy obrabotki detalej: avtoref. dis...kand.tekh.nauk / V.A. Levengarc - Kazan, 1981. – 28s.

УДК 621.822

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЬБОНАКАТНЫХ РОЛИКОВ, ИЗГОТОВЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ РЕЗЬБОШЛИФОВАНИЯ

В.М. Липка¹, С.М. Братан², Ю.Л. Рапацкий²

¹ Филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет им. Адм. Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополе, г. Севастополь, Российская Федерация

² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Исследуется влияние параметров резьбошлифования на надежность резьбонакатных роликов (РР). Приводится сравнительный анализ различных методов изготовления рабочей поверхности РР. Рассмотрены особенности тепловых явлений при резьбошлифовании рабочей поверхности РР. Показана возможность повышения качества поверхности и стойкости РР путем рационального выбора параметров процесса резьбошлифования. Приведены численные примеры, иллюстрирующие предлагаемую методику определения радиуса профиля резьбовой канавки, позволяющую предотвратить возникновение прижогов при шлифовании резьбы на РР.

Ключевые слова: резьба, надежность, резьбовое соединение, резьбонакатной ролик, резьбошлифование.

IMPROVING THE RELIABILITY OF THREADED ROLLERS MANUFACTURED BY THREADING METHOD

V.M. Lipka¹, S.M. Bratan², Ju.L. Rapatskiy²

¹ Philial FGBOU VO "State Maritime University named after Admiral F.F. Ushakov" in the city of Sevastopol, Sevastopol, Russian Federation

² Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The influence of the thread grinding parameters on the reliability of thread rollers (TR) is investigated. The comparative analysis of various methods of manufacturing the working surface of TR is given. The features of thermal phenomena in the thread grinding of the working surface of TR are considered. The possibility of improving the quality of the surface and the resistance of TR by a rational choice of the parameters of the thread grinding process is shown. Numerical examples illustrating the proposed method for determining the profile radius of the thread groove are given, which makes it possible to prevent the occurrence of burns when grinding threads on the TR.

Keywords: thread, reliability, threaded connection, thread rolling roller, thread grinding.

Введение

Важнейшим условием для технологического обеспечения надежности высоконагруженных резьбовых соединений (РС) в разнообразных изделиях машиностроения (ИМ) и других отраслей является изготовление качественных деталей с резьбой, что остается актуальной проблемой. Требования к прочности и надежности РС в современных ИМ непрерывно возрастают, что приводит к необходимости совершенствования технологии изготовления деталей с наруж-

ной резьбой (НР). Качественные резьбовые детали (РД) широкой номенклатуры с метрической и другими НР необходимы для изготовления, обслуживания, ремонта, модернизации, реновации подвижного состава автомобильного и железнодорожного транспорта, сельскохозяйственных машин, технологического оборудования, летательных аппаратов, кораблей и судов, медицинской, военной, специальной и другой техники. В частности, для наиболее распространенных в ИМ ответственных РС М8 – М20 требуются РД с НР 4–6 квалитетов, соответствующие комплексу взаимосвязанных требований по

механическим свойствам, геометрической точности, качеству поверхности. Особенностью многих ответственных РС в ИМ является необходимость замены РД с НР после разборки узла. Наиболее эффективный способ получения НР, особенно в серийном и массовом производстве, является накатывание роликами, геометрические параметры и шероховатость рабочей поверхности которых передаются готовым резьбовым деталям (РД) в виде генетической информации в процессе резьбонакатывания. Вместе с тем, резьбонакатывание может эффективно применяться в мелкосерийном и единичном производстве, при необходимости изготовления высококачественных РД. Таким образом, требования к качеству резьбонакатных роликов (РР) повышаются, но их изготовление остается сложной задачей и требует значительных затрат. [1, 2]

Предметом исследования являются закономерности формирования параметров качества рабочей поверхности РР в процессе их изготовления. Объектом исследования является технологический процесс изготовления рабочей поверхности РР методом резьбошлифования.

Критический обзор публикаций и современное состояние проблемы. Как показано в [1, 2], РР могут изготавливаться резьбофрезерованием, резьбошлифованием, резьбонакатыванием с помощью мастер-винта, лезвийной обработкой сверхтвердыми резцами, возможны также различные сочетания указанных способов. Надежность РР определяется их стойкостью – способностью накатать максимальное количество РД, соответствующих требованиям стандартов. Если за единицу принять стойкость РР, полученных резьбошлифованием, то аналогичный параметр для резьбофрезерования и резьбонакатывания составит 0,5 и 0,7 соответственно. [2] Качество и стойкость РР существенно зависят от выбора материала и технологического процесса их изготовления. Резьбошлифование, в частности, одноконтурными кругами, является эффективным, позволяющим обеспечить высокую геометрическую точность, наименьшую шероховатость, но, вместе с тем, сложным и дорогостоящим

способом изготовления РР. Наиболее вероятными факторами снижения стойкости РР, изготовленных резьбошлифованием, являются прижоги, а также другие изменения структуры материала в поверхностном слое, возникающие в процессе взаимодействия его со шлифовальным кругом. [1, 2] Действующим ГОСТ 9532-72 не допускаются какие-либо дефекты рабочей поверхности РР, в т.ч. выкрашивания, трещины, закаты, участки с пониженной твердостью либо обезуглероженные и др. Негативное влияние резьбошлифования на стойкость РР может быть в некоторой степени скомпенсировано путем использования специальных шлифовальных кругов из кубического нитрида бора, [1, 3] с прерывистым профилем, высокопористых [4], а также специальных СОТС с поверхностно-активными веществами [1, 5]. По производительности и себестоимости, преимущество перед другими способами имеет накатывание РР закаленным мастер-винтом, но его изготовление, как правило, также требует применения резьбошлифования [2]. Достоинством РР, рабочая поверхность которых изготовлена резьбонакатыванием закаленным мастер-винтом, является также существенное, от 50% до 100% упрочнение её за счет поверхностного пластического деформирования. [1] Вместе с тем, закаты, которые при резьбонакатывании могут появляться на вершинах резьбы мастер-винта, снижают его качество, а их устранение требует трудоемких доводочных операций, не всегда результативных [1]. В накатанных РР возможно также возникновение микротрещин из-за исчерпания запаса пластичности материала в поверхностных и близких к ним слоях. Лезвийная обработка резьбовой поверхности, имеющей твердость HRC 58-63, сверхтвердыми резцами высокоэффективна и позволяет несколько снизить себестоимость РР. Вместе с тем, при высоких требованиях к качеству РД с НР, соответствующих первому классу точности по ГОСТ 9539-72 (в действующей редакции, с изменениями от 11.01.2018), рационально применять резьбошлифование в качестве финишной обработки резьбовой поверхности РР, независимо от технологии, применяемой на

предшествующих этапах технологического процесса. [1] Для повышения стойкости РР целесообразно дополнительно производить упрочняющее поверхностно-пластическое деформирование их резьбовых канавок путем накатывания с использованием мастер-винта, обеспечивающего соответствие требованиям первого класса точности по ГОСТ 9539-72. [1, 2]

Цель исследований – повышение надежности РР на основе рационального выбора параметров процесса резьбошлифования при их изготовлении.

Обсуждение и результаты

Из анализа результатов производственных экспериментов, в ходе которых производились измерения геометрических параметров 10 000 болтов М10×1,25–6g из стали 38ХН с накатанной резьбой [7, 8], видно, в частности, что разброс значений среднего диаметра, оказывающий значительное влияние на собираемость и надежность РС, может выходить за пределы поля допуска, соответствующего 6 качеству, более, чем у 10% объема исследованной выборки, что существенно снижает качество автоматизированной сборки РС, особенно групповых, и может создать условия для отказов ИМ. Обеспечение стабильного качества накатывания РД, соответствующих 4 и 5 качествам, является еще более сложной задачей, процент бракованных деталей может достигать, по данным экспериментов, 12,6%. [7, 8].

Как показал анализ возможных причин брака, возникающего в ходе технологического процесса резьбонакатывания, значительную долю (до 10%) составляют различные нарушения геометрии и локальные разрушения рабочих поверхностей РР, наследуемые болтами, шпильками и другими РД с НР. [7, 8]. На (рис. 1) видны характерные повреждения и следы износа, возникшие в ходе эксплуатации РР и вызвавшие необходимость его замены до исчерпания расчетной стойкости.



Рис. 1. Резьбовые ролики с выраженными повреждениями и следами износа на рабочей поверхности

Результаты анализа данных об отказах РР позволили предположить, что одной из возможных причин внезапно возникающих деформаций и локальных разрушений рабочих поверхностей роликов могут являться дефекты, наследуемые от некачественных мастер-винтов в процессе изготовления роликов. Для проверки указанного предположения процесс накатывания роликами резьбы на мастер-винте был промоделирован с помощью метода конечных элементов в среде DEFORM-3D. Для упрощения процедуры моделирования был принят ряд допущений: рассматриваем четверть одного витка накатываемой резьбы, взаимодействующего с соответствующим участком РР, полагая, что процессы формирования всех остальных участков резьбовой поверхности протекают аналогично рассматриваемому; ролик считаем абсолютно жестким, вероятностью его разрушения пренебрегаем; пластичность материала заготовки – стали 6Х6ВЗФМС считаем постоянной величиной; влиянием пластической деформации соседних витков резьбы в процессе резьбонакатывания пренебрегаем; жесткость резьбонакатного станка считаем достаточной, упругими деформациями его элементов и вибрациями при взаимодействии роликов с заготовкой мастер-винта пренебрегаем; накатывание осуществляется в открытом контуре, при максимально допустимой глубине внедрения ролика в поверхность заготовки мастер-винта. Фрагменты визуализации моделирования процесса резьбонакатывания приведены на (рис.2).

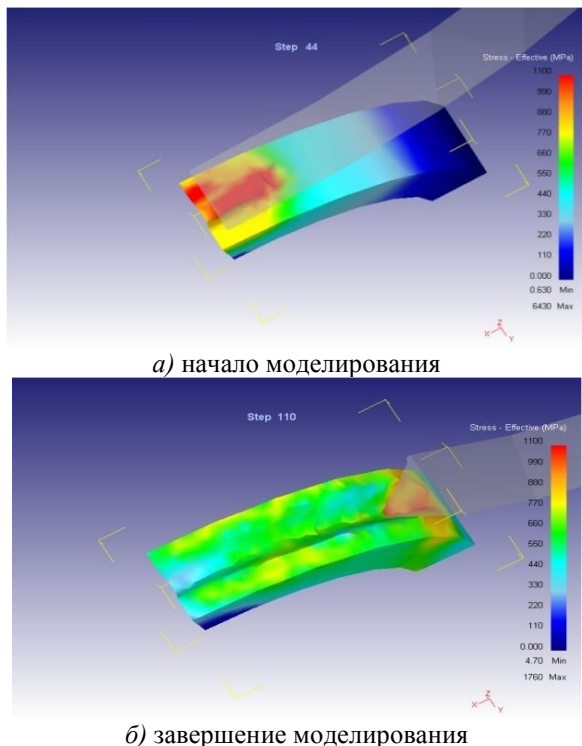


Рис. 2. Моделирование в среде DEFORM-3D процесса накатывания резьбы мастер-винтом на РР

Анализ результатов моделирования показал, что в процессе пластического деформирования при накатывании резьбы не исключено возникновение локальных напряжений, близких к пределу прочности материала заготовки, а при многократном прокатывании, необходимом для устранения закатов, возможно исчерпание запаса пластичности, в результате могут появляться микротрещины у основания выступов резьбы [9, 10, 11]. Для предотвращения наследования резьбовыми деталями с НР дефектов, возникающих при изготовлении накатанной резьбы на РР, экспериментально подтверждена [9] целесообразность шлифования резьбы на заготовках роликов с резьбой с шагом до 2,0 мм, одноконтурным кругом, без предварительного накатывания, резьбофрезерования либо нарезания резцом. [12, 13].

Вместе с тем, как было экспериментально подтверждено авторами, для РР, изготовленных нарезанием резцом либо накатыванием на двухроликовых станках с помощью мастер-винта, целесообразно в качестве финишной обработки производить резьбошлифование одноконтурным кругом, наиболее стабильные результаты были получены на

резьбошлифовальном станке модели ОШ-633Ф3 и на полуавтомате 5K822В. Сравнение шероховатости резьбовых поверхностей РР, полученных с помощью различных абразивных инструментов, показало, что значение $Ra=0,2$ мкм было достигнуто при обработке одноконтурными кругами 24А3С29К заготовок РР из стали Х12М.

Из схемы шлифования резьбы одноконтурным кругом, приведенной в [1], видно, что глубина резания и износ круга по длине контакта круга с заготовкой распределены неравномерно. Наибольшая глубина резания и, следовательно, максимальный износ соответствуют вершине профиля круга, а на прямолинейных участках указанные величины существенно меньше. Таким образом, для предотвращения прижогов при шлифовании резьбовой канавки РР необходимо разработать методику обеспечения постоянства температуры поверхности по профилю резьбы.

Исследования, проведенные в работах [1, 4, 5, 6], показали, что температура поверхности заготовки при шлифовании зависит от режимов обработки и может быть приближенно определена по следующей формуле:

$$T = C_T t^m L^n v^\gamma v_K^\lambda, \quad (1)$$

где C_T – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, характеристики круга и свойств СОЖ; t – глубина резания; L – длина дуги контакта; v_K – скорость круга; v – окружная скорость заготовки.

Для определения температуры в любой точке профиля резьбы необходимо знать режимы шлифования в данной точке. Тогда, согласно формуле (1)

$$T_\alpha = C_T t_\alpha^m L_\alpha^n v_\alpha^\gamma v_{K\alpha}^\lambda. \quad (2)$$

Из размеров болтов и шпилек с метрической резьбой видно, что глубина резьбовой канавки составляет менее 5% от диаметра РД. В связи с этим изменение скорости v_α по профилю резьбы не превышает 10%. Изменение скорости круга $v_{K\alpha}$ по профилю составляет менее 1%, что практически не сказывается на температуре

поверхности. Таким образом, можно считать, что изменения величин v_α и $v_{K\alpha}$ по профилю резьбы не оказывают заметного влияния на температуру поверхности.

Основными параметрами режима обработки, изменяющимися по профилю резьбы, являются глубина резания t_α и длина дуги контакта L_α . Преобразуем формулу (2):

$$t_\alpha^m L_\alpha^n = \frac{T_\alpha}{C_T v_\alpha^\gamma v_{K\alpha}^\lambda}. \quad (3)$$

Из данной формулы следует, что для обеспечения одинаковой температуры поверхности по профилю резьбы $T_\alpha = \text{const}$ необходимо выдержать условие $t_\alpha^m L_\alpha^n = \text{const}$. Условие профилирования вершины круга можно представить следующим образом:

$$t_\alpha^m L_\alpha^n = t_0^m L_0^n.$$

Отсюда

$$\left(\frac{t_\alpha}{t_0}\right)^m = \left(\frac{L_0}{L_\alpha}\right)^n. \quad (4)$$

Длина дуги контакта может быть приближенно определена по формуле $L \approx \sqrt{td}$ [2, 12], где t – глубина резания в радиальном направлении; d – диаметр заготовки. При шлифовании резьбы $L_\alpha \approx \sqrt{t_\alpha d}$, а $L_0 \approx \sqrt{t_0 d}$. Тогда из формулы (4) получим

$$\left(\frac{t_\alpha}{t_0}\right)^m = \left(\sqrt{\frac{t_0}{t_\alpha}}\right)^n.$$

Решая это уравнение относительно t_α , находим

$$t_\alpha = \frac{t_0^{1+\frac{n}{2m}}}{t_y^{\frac{n}{2m}}}. \quad (5)$$

Таким образом, мы нашли взаимосвязь глубин резания t_α и t_y , которые позволяют получить одинаковую температуру поверхности по профилю резьбы.

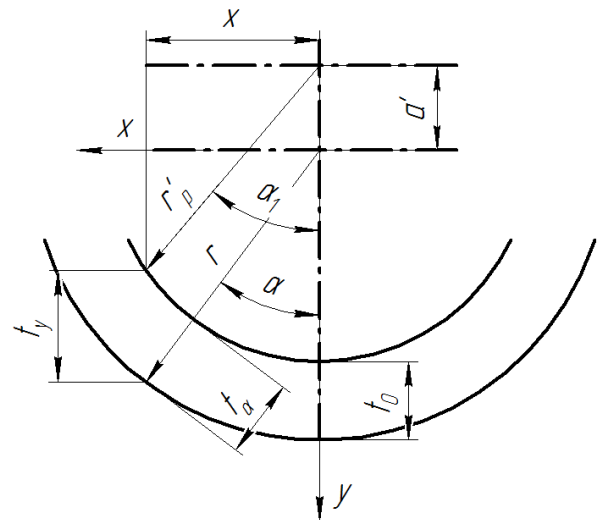


Рис. 3. Схема для распределения глубины резания по профилю круга из постоянства температуры по профилю резьбы

На рис. 3 показана схема для распределения глубины резания по профилю круга из постоянства температуры по профилю резьбы, из которого находим, что $t_\alpha = t_y \cos \alpha$, тогда из формулы (5) получим

$$t_\alpha = t_0 (\cos \alpha)^{\frac{0,5n}{m+0,5n}} \quad (6)$$

и

$$t_y = t_0 \left(\frac{1}{\cos \alpha}\right)^{\frac{m}{m+0,5n}}. \quad (7)$$

При шлифовании резьбы РР из закаленной стали 12ХМ кругами 63С4С18К температура поверхности прямо пропорциональна $\sqrt{tL}$ [4, 5, 12]. В этом случае из формул (6) и (7) получим

$$t_\alpha = t_0 \sqrt[3]{\cos \alpha} \quad (8)$$

и

$$t_y = \frac{t_0}{\sqrt[3]{\cos^2 \alpha}}. \quad (9)$$

Как следует из формул (6) и (7), для обеспечения одинаковой температуры поверхности профиль резьбовой канавки, поступающей на шлифование, должен отличаться от дуги окружности и иметь сложную форму. Получение такого профиля является технически трудной задачей,

требующей для ее решения создание специальных правящих устройств. В [4, 5] показано, что подобный профиль нецелесообразно создавать из-за быстрого его нарушения при шлифовании. Поэтому сложный профиль целесообразно аппроксимировать более простым. Рассмотрим возможность аппроксимации профиля канавки, при шлифовании которой температура поверхности по профилю резьбы одинакова, дугой окружности.

Из (рис. 3)

$$r'_p = r - t_0 + a'. \quad (10)$$

Для определения r'_p нужно знать значение a' .

Проектируя r'_p и r на ось Y , получим $t_y = (r \cos \alpha + a') - r'_p \cos \alpha_1$.

Подставляя значение t_y из формулы (7), получим

$$\begin{aligned} r \cos \alpha + a' - r'_p \cos \alpha_1 = \\ = t_0 \left(\frac{1}{\cos \alpha} \right)^{\frac{m}{m+0,5n}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Значение угла α_1 из (рис. 1) равно $\alpha_1 = \arcsin \frac{x}{r'_p}$.

Так как $x = r \sin \alpha$, получим

$$\cos \alpha_1 = \sqrt{1 - \frac{r^2 \sin^2 \alpha}{r_p'^2}}.$$

Подставляя значение $\cos \alpha_1$ в формулу (11) и учитывая значение r'_p из формулы (10), получим

$$\begin{aligned} r \cos \alpha + a' - \sqrt{(r - t_0 + a')^2 - r^2 \sin^2 \alpha} = \\ = t_0 \left(\frac{1}{\cos \alpha} \right)^{\frac{m}{m+0,5n}}. \end{aligned}$$

Обозначив $\frac{t_0}{r} = \eta$; $\left(\frac{1}{\cos \alpha} \right)^{\frac{m}{m+0,5n}} = \mu$ и решая это уравнение относительно a' , получим

$$a' = C t_0, \quad (12)$$

где

$$C = \frac{(1 - 0,5\eta) - \mu(\cos \alpha - 0,5\eta\mu)}{(1 - \eta) - (\cos \alpha - \eta\mu)}. \quad (13)$$

Подставляя в формулу (10) значение a' , получим

$$r'_p = r - (1 - c)t_0$$

или

$$r'_p = r[1 - \eta(1 - c)]. \quad (14)$$

Таким образом, для определения величины r'_p необходимо знать значение коэффициента C . Значения отношения $\eta = \frac{t_0}{r}$ при шлифовании рабочих поверхностей РР не превышают 0,1, а профиль резьбы ограничивается углом $\alpha = 60^\circ$. Значения коэффициента C вычисленные по формуле (13) при шлифовании резьбы РР из стали 12ХМ в зависимости от угла α и отношения $\frac{t_0}{r}$, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость коэффициента C от отношения $\eta = \frac{t_0}{r}$ и угла α

η	$\alpha, ^\circ$	
	55	60
0,01	0,37	0,40
0,03	0,35	0,38
0,05	0,34	0,36
0,10	0,29	0,30

При выборе значения коэффициента C для аппроксимации профиля вершины круга руководствуемся следующими суждениями:

1. С увеличением коэффициента C радиус r_p дуги окружности, аппроксимирующей профиль (14), увеличивается. Это приводит к уменьшению толщины слоя t_α , снимаемого на боковых участках резьбы, и к уменьшению температуры ее поверхности. Поэтому, если в формуле (14) принять в качестве C значение, находящееся в середине диапазона, приведенного в таблице 1, то при шлифовании резьбовой канавки могут возникнуть прижоги на тех участках профиля, у которых коэффициент C больше принятого;

2. При малых глубинах резания t_0 , а следовательно, при малых значениях η ($\leq 0,03$) тепловые воздействия на поверхностный слой резьбы незначительны. Поэтому, если значения C на некоторых участках профиля будут больше принятого значения коэффициента C , то это не приведет к дефектам;

3. Рабочий профиль резьбы (от дна до фаски переката шариков) ограничивается углом $\alpha=63^\circ$. Поэтому выбор коэффициента C будет производиться в этом диапазоне углов.

С учетом вышеизложенного, из табл. 1 выбираем для аппроксимации сложного профиля резьбы дугой окружности коэффициент $C=0,38$. Подставляя это значение C в формулу (14), получим

$$r_p = r - 0,62t_0. \quad (15)$$

Сравнивая коэффициенты A , полученные по результатам экспериментов в [14], из условия $\Delta\bar{r} = 0$, с коэффициентом $A=0,62$, полученным из условия постоянства температуры поверхности о профилю резьбы, можно сделать вывод, что построение операции шлифования согласно условию постоянства профиля круга не противоречит условию $T_\alpha \leq T_0$, так как глубина резания t_α при $A=0,54$ меньше, чем при $A=0,62$. Для уточнения значений коэффициента A , приведенных в [14], авторами были проведены эксперименты при шлифовании резьбы по схеме $r_p = r - 0,62t_0$, результаты представлены в табл. 2.

С учетом полученных экспериментальных результатов, уравнение, аппроксимирующее зависимости $\Delta\bar{r} = f(A)$, может быть представлено в следующем виде:

при $t_0 = 0,05$ мм

$$\Delta\bar{r} = 10,7 - 26,4A + 12A^2, \text{ мкм};$$

при $t_0 = 0,10$ мм

$$\Delta\bar{r} = 22,9 - 53,4A + 19,2A^2, \text{ мкм};$$

при $t_0 = 0,15$ мм

$$\Delta\bar{r} = 56,8 - 134,3A + 54,2A^2, \text{ мкм}.$$

Из этих уравнений при условии $\Delta\bar{r} = 0$ определяем значения коэффициента A : при

$t_0 = 0,05$ мм $A=0,536$; при $t_0 = 0,10$ мм $A=0,536$ и при $t_0 = 0,15$ мм $A=0,541$.

Таблица 2. Изменения радиуса профиля Δr кругов 63C4C18K при шлифовании метрической резьбы с шагом 1,25 мм на РР из стали 12ХМ при $A=0,62$ мм

Номер наблюдения	Глубина резания t_0 , мм		
	0,05	0,10	0,15
1	-0,001	-0,004	-0,007
2	0,001	0	-0,008
3	0,002	-0,002	-0,001
4	-0,001	0	-0,004
5	0,001	-0,001	-0,001
6	-0,001	-0,003	-0,004
7	-0,002	-0,001	-0,004
8	0,002	-0,006	-0,007
9	-0,003	-0,004	-0,003
10	-0,003	-0,005	-0,008
$\Delta\bar{r}$, мм	-0,001	-0,003	-0,005
$S^2 \cdot 10^6$, мм ²	3,5	4,5	7,1

Полученные значения коэффициента A достаточно близки между собой, их расхождение носит случайный характер и не превышает 0,93%. Следовательно, в указанном диапазоне глубина резания не оказывает существенного влияния на характер износа круга по его профилю. С учетом этого, математическая модель процесса шлифования, обеспечивающего стабильность профиля круга, будет иметь вид

$$r_p = r - 0,54t_0. \quad (16)$$

Сравнивая формулы (16) и (15), отметим, что глубина резания t_α и длина дуги контакта L_α при $A=0,54$ будут меньше, поскольку значение r_p , вычисленное по (16), больше аналогичной величины, найденной по (15). Это создает некоторый запас надежности процесса резьбошлифования, уменьшая вероятность появления прижогов, по сравнению со схемой (15).

Выводы

Проведенные исследования позволили получить распределение глубины резания по профилю круга, при котором температура поверхности одинакова по профилю резьбы. Доказано, что профиль резьбовой канавки,

обеспечивающий получение такого распределения, при шлифовании метрической резьбы можно аппроксимировать дугой окружности. Для получения одинаковой температуры по профилю резьбы радиус профиля канавки, подлежащей обработке, должен быть меньше радиуса профиля круга на величину $0,62t_0$ (где t_0 – глубина резания на вершине профиля круга). Установлено, что для обеспечения стабильности радиуса профиля резьбы, достигаемой равным износом круга в радиальном направлении, радиус профиля резьбовой канавки заготовки должен быть меньше радиуса профиля круга на $0,54t_0$. При этом глубина резания и длина дуги контакта на боковых участках профиля круга меньше, чем при шлифовании по схеме, обеспечивающей одинаковую температуру поверхности по профилю резьбы, что уменьшает вероятность появления прижогов. Поэтому шлифование резьбы по схеме (16) позволяет получить минимальные изменения радиуса профиля круга без снижения производительности обработки.

Полученные результаты позволяют повысить надежность РР и создать условия для накатывания РД с НР, отвечающих требованиям стандартов, минимизировать процент брака. Все перечисленные мероприятия позволяют обеспечить надежность РС в ИМ, получаемых ручной и автоматизированной сборкой.

Применение полученных результатов возможно на предприятиях машиностроения и других отраслей, выпускающих РР.

Направление дальнейших исследований предполагает дополнительную проверку и уточнение полученных результатов для обеспечения стабильного качества и гарантированной стойкости РР, получаемых путем резьбошлифования.

Список литературы

1. Киричек А.В. Резьбонакатывание.: Библиотека технолога. / А.В. Киричек, А.Н. Афонин. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.

2. Якухин В.Г. Изготовление резьб. – Справочник. / В.Г. Якухин, В.А. Ставров. – М.: Машиностроение, 1989. – 192 с.
3. Захаренко И.П. Шлифование резьбы кругами из кубонита. / И.П. Захарченко, И.М. Цахунова, Э.А. Белецкий. – М.: Машиностроение, 1974. – 144 с.
4. Полканов Е.Г. Шлифование резьбы высокопористыми абразивными кругами / Е.Г. Полканов // Технология машиностроения. – 2002. – №6. – С.17-28.
5. Высокотехнологичные методы металлообработки: учебник. / Под ред. О.В. Таратынова. – М.: МГИУ, 2011. – 362 с.
6. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке/ Ю.К. Новоселов – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. – 304 с.
7. Липка В.М. Повышение качества и надежности резьбовых соединений в условиях серийного производства силовых агрегатов для легковых автомобилей / В.М. Липка, В.Я. Копп, Ю.Л. Рапацкий // Вестник СевНТУ. Сер.: Машиноприборостроение и транспорт: сб. науч. тр. – Севастополь, 2013. – Вып.139. – С. 154–160.
8. Липка В.М. Оценка влияния параметров резьбовых крепежных изделий на качество сборки силовых агрегатов автомобилей / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Вестник СевНТУ. сер. Машиноприборостроение и транспорт: сб. науч. тр. – Севастополь, 2010. – вып. 107. – С. 121–127.
9. Липка В.М. Анализ стойкости резьбонакатного инструмента в условиях автоматизированного массового производства и пути её повышения / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Вестник СевНТУ. Сер. Машиноприборостроение и транспорт.: сб. науч. трудов. — Севастополь.: Изд-во СевНТУ, 2011. — С.68—75.
10. Рапацкий Ю.Л. Математическая модель процесса накатывания наружных резьб роликами / Ю.Л. Рапацкий, В.М. Липка // Вестник СевНТУ. Сер.Машиноприборостроение и транспорт: сб.науч.тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2011. – Вып. 111. – С. 138 – 143.
11. Липка В.М. Повышение точности математической модели процесса накатывания наружных резьб на двухроlikовых станках / В.М. Липка // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем.: сб. науч. трудов.— Краматорск, 2011. — № 28. — С. 305—310.
12. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении/З.И. Кремень, В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин: под общ. ред. З.И. Кременя. – СПб.: Политехника, 2007 – 424 с.
13. Kremen Z.I. A new generation of high-porous vitrified CBN grinding wheels. – JDR, 2003. – №4. – P.53—56.
14. Мухортов В.Н. Определение глубины дефектного слоя при черновом шлифовании / В.Н. Мухортов// Вестник машиностроения, 1985. – №3. – С.41 – 42.

References

1. Kirichek A.V. Rezbonakatyvaniye.: Biblioteka tekhnologa. / A.V. Kirichek, A.N. Afonin – M.: Mashinostroyeniye, 2009.-312 s.
2. Yakukhin V.G. Izgotovleniye rez'b. / V.G. Yakukhin, V.A. Stavrov – Spravochnik: M.: Mashinostroyeniye, 1989 –192 s.
3. Zakharenko I.P. Shlifovaniye rez'by krugami iz kubonita. / I.P. Zakharenko, I.M. Tsakhunova, E.A. Beletskiy. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 144 s.
4. Polkanov Ye.G. Shlifovaniye rez'by vysokoporistymi abrazivnymi krugami // Tekhnologiya mashinostroyeniya. 2002 №6 – S.17—28.
5. Vysokotekhnologichnyye metody metalloobrabotki: uchebnik – pod red. O.V. Taratynova. – M.: MGIU, 2011. – 362 s.
6. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke/ YU.K. Novoselov – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2013. –304 s.
7. Lipka V.M. Povysheniye kachestva i nadezhnosti rez'bovykh soyedineniy v usloviyakh seriynogo proizvodstva silovykh agregatov dlya legkovykh avtomobiley / V.M. Lipka, V.YA. Kopp, YU.L. Rapatskiy // Vestnik SevNTU. Ser.: Mashinopriborostroyeniye i transport: sb. nauch. tr. – Sevastopol', 2013. – Vyp.139. – S. 154-160.
8. Lipka V.M. Otsenka vliyaniya parametrov rez'bovykh krepizhnykh izdeliy na kachestvo sborki silovykh agregatov avtomobiley / V.M. Lipka, YU.L. Rapatskiy // Vestnik SevNTU. ser. Mashinopriborostroyeniye i transport: sb. nauch. tr. – Sevastopol', 2010. – vyp. 107. – S. 121-127.
9. Lipka V.M. Analiz stoykosti rez'bonakatnogo instrumenta v usloviyakh avtomatizirovannogo massovogo proizvodstva i puti yeyo povysheniya / V.M. Lipka, YU.L. Rapatskiy // Vestnik SevNTU. Ser. Mashinopriborostroyeniye i transport: sb. nauch. trudov. — Sevastopol: Izd-vo SeNTU, 2011. — S.68–75.
10. Rapatskiy YU.L. Matematicheskaya model' protsessa nakatyvaniya naruzhnykh rez'b rolikami / YU.L. Rapatskiy, V.M. Lipka // Vestnik SevNTU. Ser.Mashino – priborostroyeniye- i transport: sb.nauch.tr. — Sevastopol': izd-vo SevNTU, 2011. — Vyp. 111. — S. 138-143.
11. Lipka V.M. Povysheniye tochnosti matematicheskoy modeli protsessa nakatyvaniya naruzhnykh rez'b na dvukhrolikovykh stankakh / V.M. Lipka // Nadezhnost' instrumenta i optimizatsiya tekhnologicheskikh sistem.: sb. nauch. trudov.— Kramatorsk, 2011. — № 28. — S. 305-310.
12. Kremen' Z.I. Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroyenii/Z.I. Kremen', V.G. Yur'yev, A.F. Baboshkin: pod obshch. red. Z.I. Kremnya. — SPb.: Politehnika, 2007 – 424 s.
13. Kremen Z.I. A new generation of high-porous vitrified CBN grinding wheels. – JDR, 2003. – №4. – P.53–56.
14. Mukhortov V.N. Opredeleniye glubiny defektnogo sloya pri chernovom shlifovanii / V.N. Mukhortov// Vestnik mashinostroyeniya, 1985. – №3. – s.41–42.

УДК 621.882.736

ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ МАЛОГО ДИАМЕТРА ПОЛУЧЕННЫХ ДЕФОРМИРУЮЩЕ-РЕЖУЩИМИ МЕТЧИКАМИ

П.А. Новиков¹, В.А. Крамарь¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрены варианты диагностики процесса обработки внутренних резьб полученных деформирующе-режущими метчиками, дана критика рассмотренных методов. Предложен способ диагностики, в котором в качестве диагностического сигнала предлагается норма основного времени обработки. Данный способ лишен недостатков традиционных методов и может быть применен в условиях автоматизированного и гибкого производства. Для реализации предложенного способа рекомендуется применять станки, оснащенные приводом главного движения лишенным жесткой связи между выходной мощностью и скоростью. Предложены математические модели и методика для определения граничных значений диагностического сигнала, где критерием качества выступает средний диаметр формируемой резьбы.

Ключевые слова: диагностика, резьба, малый диаметр, деформирующе-режущий метчик.

DIAGNOSTICS OF THE PROCESS OF CUTTING INTERNAL SCREW-THREADS OF SMALL DIAMETER OBTAINED BY DEFORMING-CUTTING TAPS

P.A. Novikov¹, V.A. Kramar¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

In the article the variants of the diagnostics of the process of processing internal threads obtained by deforming-cutting taps are considered, the criticism of the methods considered is given. A diagnostic method is proposed in which the norm of the main processing time is proposed as a diagnostic signal. This method is devoid of shortcomings of traditional methods and can be applied in the conditions of automated and flexible production. To implement the proposed method, it is recommended to use machines equipped with a main drive drive without a rigid connection between output power and speed. Mathematical models and methods for determining the boundary values of a diagnostic signal are proposed, where the average diameter of the formed thread is the criterion of quality.

Keywords: diagnostics, thread, small diameter, deforming-cutting tap.

Введение

В автоматизированном, и в большей степени гибком производстве, нередки случаи поломки инструмента, что влечет за собой длительный простой оборудования, а также потери от брака детали при поломке инструмента. Особенно велик простой оборудования во вторую и третью смену работы предприятия, из-за уменьшения числа обслуживающего персонала. Это предопределяет необходимость применения в указанных условиях систем диагностики состояния

технологического оборудования, и инструмента в частности.

В настоящее время в машиностроении для осуществления диагностики состояния объекта используют косвенные и прямые системы контроля [1-7].

Первый вид контроля проводится в промежутках между циклами работы оборудования. При этом осуществляется диагностика рабочей части инструмента с помощью различного вида щупов, оптических, пневматических и индуктивных датчиков [3, 7].

Недостатки этого вида контроля: сложность, а зачастую и невозможность, проведения контроля из-за геометрической сложности инструмента; недостаточная точность устройств; увеличение времени операции из-за осуществления диагностики инструмента.

Второй вид диагностики осуществляется непосредственно в процессе обработки и основан на измерении силовых составляющих процесса резания [1, 3, 5]. Многочисленные исследования показали, что с увеличением износа рабочих элементов инструмента увеличиваются действующие на него нагрузки. На (рис. 1) представлены примеры изменения силовых характеристик процесса обработки в зависимости от тех или иных условий. Системы, основанные на измерении сил, используют следующий алгоритм:

ния контрольных датчиков в конструкции станков с сохранением при этом требуемой паспортной жесткости последних. Особые трудности возникают в процессах, где основной силовой характеристикой обработки является момент сил резания, т.е. в процессах сверления, зенкерования, резьбонарезания метчиками и т.п.

Третий вид систем диагностики основан на измерении и анализе вибраций присутствующих при обработке [2, 3, 4, 6, 7]. Алгоритм работы системы подобен системам по контролю сил, однако вместо значений сил используется уровень мощности спектра: сперва осуществляют «обучение» системы и задают максимально допустимую мощность спектра для интересующей частоты (частот); в процессе работы, осуществляется сравне-

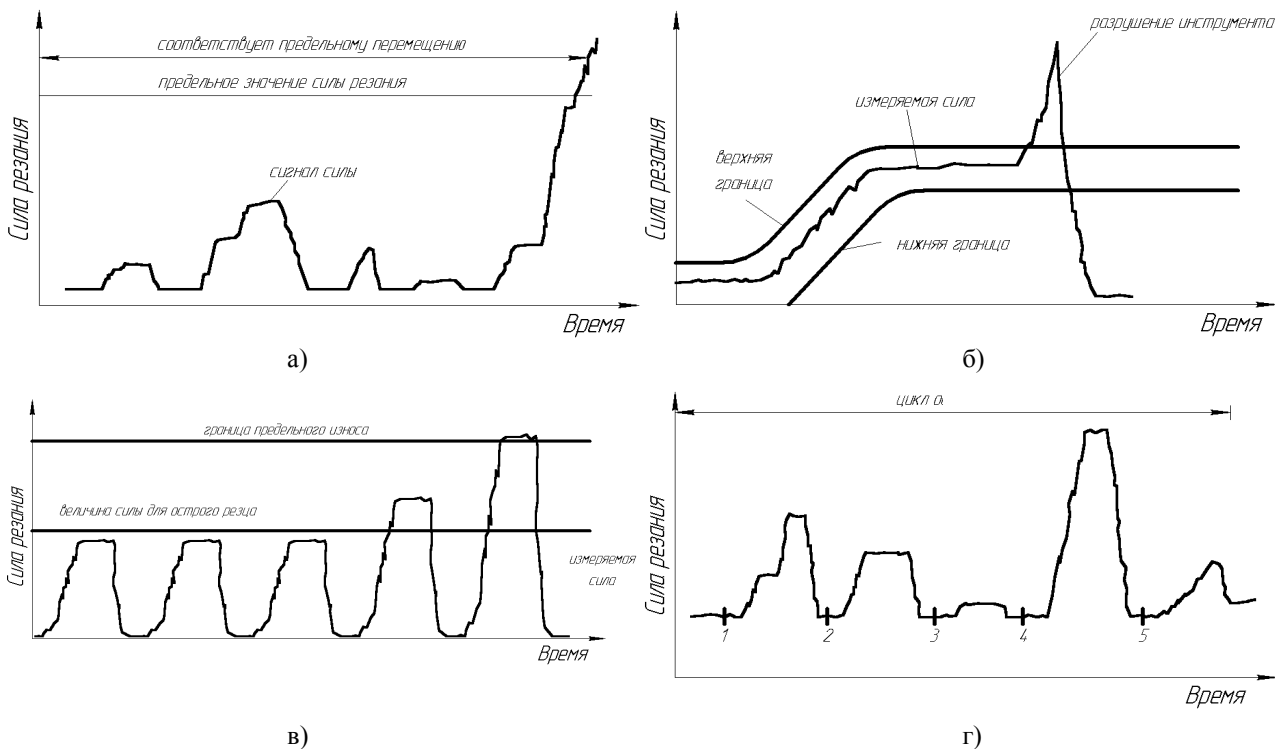


Рис.1. Контроль граничных условий в зависимости от силы резания:

а – при перегрузке; б – при разрушении режущих кромок; в – при износе инструмента; г – при обработке различными инструментами.

определяется граничное значение силы, при превышении которой процесс обработки считается экстремальным и работа технологического оборудования прекращается. Недостатками данного вида систем диагностики являются большие трудности встраива-

ние полученного сигнала с заданным на основании чего делается вывод о состоянии инструмента и процесса обработки. Недостатком данного метода являются жесткие требования к постоянству физико-механических свойств инструментов одной

группы и одного типоразмера, используемых при замене изношенного инструмента; работа системы по результату, т.е. для осуществления спектрального анализа и дальнейшей диагностики необходимо полное выполнение цикла, что дает высокую долю риска брака изделия (поломки инструмента) при приближении диагностического сигнала к его границе.

При нарезании внутренних резьб малых диаметров единственным оперативным методом определения качества обработанных отверстий, а соответственно и процесса обработки, является контроль с помощью резьбовых калибров. Однако контролировать каждое или случайно выбранное из партии отверстие в автоматизированном производстве, ни тем более в гибком не представляется возможным.

Наиболее близко к процессу обработки внутренних резьб малых диаметров находится процесс сверления отверстий для которого разработан ряд методов и устройств контроля [8]. При износе сверла увеличивается мощность резания, растет сила тока в обмотке статора электродвигателя. По изменению и повышению силы тока, косвенно, судят о величине момента сил резания.

Однако, процесс обработки внутренних резьб малых диаметров относится к быстропротекающим. Так, цикл нарезания резьбы М3 глубиной 6 мм составляет 1,08с (при $n=1000\text{мин}^{-1}$). Быстродействие известных систем управления, из-за большой инерционности системы станка и малого времени процесса обработки, сопоставимо с величиной цикла нарезания. Таким образом, применить данный и подобные способы для контроля и диагностики процесса обработки внутренних резьб малого диаметра невозможно.

Соответственно, целью статьи является предложение способа диагностики процесса обработки внутренних резьб деформирующе-режущими метчиками для условий автоматизированного и гибкого производств и метода определения граничных условий протекания процесса.

Основные рассуждения и результаты

В качестве диагностического сигнала предлагается использовать время резьбообработки, более точнее – норму основного времени T_o обработки резьбы, осуществлять его анализ и интенсивность изменения значений при получении группы отверстий. Безусловно, в случае анализа группы обрабатываемых отверстий, они должны иметь одинаковые размеры, а материал изделий одинаковые свойства.

Предлагаемый способ может быть реализован на станках, где привод главного движения лишен жесткой связи между изменением мощности обработки и скоростью резания (традиционные асинхронные электродвигатели, шаговые электродвигатели и т.п.). Подобные условия могут быть реализованы на станках оснащенных, например, двигателями постоянного тока, гидравлическими или пневматическими двигателями.

На (рис. 2) представлена конструкция резьбонарезной головки, состоящей из пневмоцилиндра 1, блока преобразования движения 2 и мультипликатора 3 [9]. При работе головки поршень с закрепленным на нем штоком совершает возвратно-поступательные движения в пневмоцилиндре 1, эти движения преобразуются в блоке 2 во вращательные, умножаются блоком 3 и передаются на шпиндель (на рисунке не показан).

Обработки резьбового отверстия, с применением резьбонарезной головки, от момента врезания метчика в отверстие до момента остановки инструмента характеризуется уменьшением скорости резания. Изменение скорости резания обусловлено увеличением момента сил резания, изменяющегося по мере врезания зубьев инструмента в обрабатываемое отверстие и отсутствием жесткой связи между мощностью и скоростью резания в характеристиках двигателя (пневмоцилиндра). С уменьшением скорости резания увеличивается время обработки T_o .

При обработке партии деталей, от отверстия к отверстию, увеличивается износ рабочих элементов инструмента. Износ влечет за собой увеличение силовых и, как ре-

зультат, временных характеристик процесса. По интенсивности увеличения времени резьбонарезания и приближении его к некоторому граничному значению, превышение которого указывает на отклонения от нормального протекания процесса, можно судить о необходимости остановки технологического процесса и необходимости оперативной замены инструмента.

Для определения граничного значения диагностического сигнала, в данном случае – времени резьбообработки, необходимо наличие математических моделей, характеризующих работу технологической системы и методики расчета интересующей величины.

При обработке резьб малых диаметров наиболее значимой погрешностью является разбиение среднего диаметра резьбы за счет деформации скручивания метчика [10].

Величина смещения, при нахождении в отверстии N – го количества зубьев, определяется по зависимости [10]:

$$X^N = \frac{P}{2\pi} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N m_i l_i}{J_{c.нр.} G} \quad (1)$$

где P – шаг резьбы; m_i – момент резания на i -ом зубе метчика; l_i – длина от рассматриваемого зуба до последующего (в случае последнего зуба участвующего в резании до

плоскости закрепления метчика); $J_{c.нр.}$ – среднеприведенный момент инерции по длине метчика; G – модуль упругости при кручении.

При этом, смещение X^N есть сумма смещений каждого зуба метчика участвующего в обработке отверстия

$$X^N = X_1 + X_2 + \dots + X_N = \frac{P}{2\pi J_{c.нр.} G} (m_1 l_1 + m_2 l_2 + \dots + m_N l_N) \quad (2)$$

Величина смещения X^N не должна быть больше допуска Δ_{oc} в осевом направлении резьбы:

$$\Delta_{oc} = 0,5ES \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{6}\right), \quad (3)$$

где ES – допуск среднего диаметра внутренней резьбы.

Для определения граничного значения достаточно условие $X^N = \Delta_{oc}$. Таким образом, максимально допустимый момент на каждом i -м зубе определяется по формуле:

$$m_i = \frac{2\pi \Delta_{oci} J_{c.нр.} G}{P l_i} \quad (4)$$

После получения максимально возможных для смещения Δ_{oc} моментов сил, производится определение времени резьбообработки.

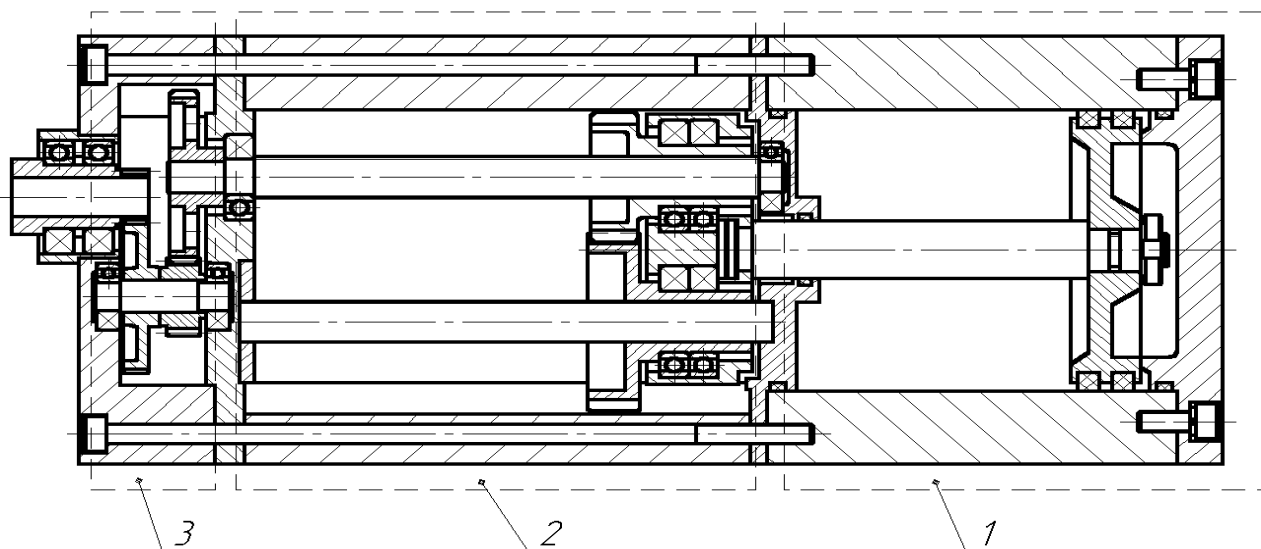


Рис.2. Конструкция резьбонарезной головки:

1 – пневмоцилиндр; 2 – блок преобразования движения; 3 – мультипликатор.

полости; f_2 – эффективная площадь входного отверстия в штоковой полости; σ – безразмерное давление.

$$\left\{ \begin{aligned} & m_{\Sigma} \frac{d^2 x}{dt^2} \left(1 + \frac{\mu}{\cos \alpha} + \frac{\mu}{\cos \alpha} \cdot \frac{z_3}{z_4} \right) + J_{\Sigma} \left(\frac{D_{cp5}^2 P \left(\frac{d^2 x}{dt^2} (D_{cp5}^4 + x^2 P^2) - 2 \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 P^2 x \right)}{D_{cp}^4 + x^2 P^2} \right) = \\ & = p_1 F_1 - p_2 F_2 - N_{mp} + G - 4 \frac{M_{pez}}{P} \frac{z_3 z_8 z_{10}}{z_4 z_7 z_9}; \\ & \frac{dp_1}{dt} = \frac{k f_1 K p_m \sqrt{RT}}{F_1(x_{01} + x)} \varphi(\sigma) - \frac{k p_1}{(x_{01} + x)} \cdot \frac{dx}{dt}; \\ & \frac{dp_2}{dt} = - \frac{k f_2 K p_2^{\frac{3k-1}{2k}} \sqrt{RT}}{F_2(s + x_{02} - x) p_2^{\frac{k-1}{2k}}} \varphi(\sigma) + \frac{k p_2}{(s + x_{02} - x)} \cdot \frac{dx}{dt}; \\ & \varphi(\sigma) = \begin{cases} 0,2588, & npu \quad \sigma \leq 0,528 \\ \sqrt{\sigma^{\frac{2}{k}} - \sigma^{\frac{k+1}{k}}}, & npu \quad 0,528 < \sigma < 1. \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Система уравнений (5) является математическим описанием «мутуализма» нескольких элементов резьбонарезной головки: пневмоцилиндра, блока преобразования движения и мультипликатора. Основу данной модели составляет динамическая модель работы пневмоцилиндра, позаимствованная в [11]. В модели также учтена инерционная составляющая работы поступательно и вращательно движущихся элементов конструкции, а также моментов сил, возникающих в процессе формирования резьбы - сил резания.

Переменная $M_{рез}$ в системе уравнений (5) раскрывает характер изменения момента сил резания на рабочей части инструмента, и выражается как:

$$M_{pez} = \begin{cases} m_1, & npu\ x \geq X \\ m_1 + m_2, & npu\ x \geq X + \Delta x \\ m_1 + m_2 + m_3, & npu\ x \geq X + 2\Delta x \\ \\ \sum_{i=1}^N m_i, & npu\ x \geq X + (N-1)\Delta x \end{cases} \quad (6)$$

где $m_1, m_2, m_3, \dots, m_i$ – моменты сил определяемые согласно (4); X – перемещение поршня до врезания метчика; Δx – перемещение поршня до врезания следующего зуба метчика.

В зависимости от обрабатываемого материала, типоразмеров обрабатываемой резьбы производят выбор давления рабочего тела (сжатого воздуха) p_1 . При износе инструмента и увеличении сил резания, увеличивается время резьбонарезания.

Выводы

Применение предложенного способа для диагностики процесса резьбообработки при помощи деформирующе-режущих метчиков реализуется с минимальными затратами аппаратных средств. Реализация данного способа позволяет оперативно осуществлять замену инструмента, исходя из интенсивности приближения диагностического сигнала к границе.

На основании проведенных исследований могут быть разработаны устройства диагностики и системы управления процессом образования резьб малых диаметров для технологического оборудования гибких автоматизированных производств.

Список литературы

1. Адаптивное управление станками/Б.М. Базров, Б.С. Балакшин, И.М. Баранчукова и др. Под ред. проф. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973, – 688с.
2. Подураев В.Н. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии/ В.Н. Подураев, А.А. Барзов, В.А. Горелов. – М.: Машиностроение, 1988. – 56с.
3. Остафьев В.А. Диагностика процесса металлообработки/ В.А. Остафьев, В.С. Антониук, Г.С. Тымчик. – К.: Техника, 1991. – 151.
4. Сидоров В.А. Техническая диагностика механического оборудования/ В.А. Сидоров, В.М. Кравченко, В.Я. Седуш и др. – Донецк: Новый мир, 2003. – 125 с.
5. Юркевич В.В. Контроль и диагностика в автоматизированном производстве/ В.В. Юркевич// Машиностроитель. – 2003. – №2. – С.36-41.
6. Козочкин М.П. Виброакустическая диагностика при твердом точении/ М.П. Козочкин, Ф.С. Сабиров, А.Н. Попиков// Вестник МГТУ «Станкин». – 2009. – №1(5). – С. 23-29.
7. Сафарбаков А.М. Основы технической диагностики: учебное пособие/ А.М. Сафарбаков, А.В.

- Лукьянов, С.В. Пахомов. – Иркутск: ИрГУПС, 2006, –2016с.
8. Шаров Е.Т., Тараненко В.А. Способ защиты инструмента от перегрузок и устройство для его реализации// Авт. свид. SU №1155421. Оpubl. 15.05.86, Бюл. №18.
9. Канареев Ф.Н., Машин С.П. Резьбонарезная головка// Авт. свид. SU №1038129. Оpubl. 12.03.83, Бюл №28.
10. Канареев Ф.Н. Механизм образования погрешностей внутренних резьб малых диаметров (М2...М6) за счет деформации кручения метчиков/ Ф.Н. Канареев, Т.В. Резинкина// Материалы научно-технической конференции “Технология машиностроения: проблемы и перспективы”. – Севастополь, 2000. – С.25-28.
11. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин / Е. В. Герц. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.

References

1. Adaptivnoe upravlenie stankami/B.M. Bazrov, B.S. Balakshin, I.M. Baranchukova i dr. Pod red. prof. B.S. Balakshina. – M.: Mashinostroenie, 1973, – 688s.
2. Poduraev V.N. Tekhnologicheskaya diagnostika rezaniia metodom akusticheskoi emissii/ V.N. Poduraev, A.A. Barzov, V.A. Gorelov. – M.:Mashinostroenie, 1988. – 56s.
3. Ostaf'ev V.A. Diagnostika protsessa metalloobrabotki/ V.A. Ostaf'ev, V.S. Antoniuk, G.S. Tymchik. – K.:Tekhnika, 1991. – 151.
4. Sidorov V.A. Tekhnicheskaya diagnostika mekhanicheskogo oborudovaniia/ V.A. Sidorov, V.M. Kravchenko, V.Ia. Sedush i dr. – Donetsk: Novyi mir, 2003. – 125 s.
5. Iurkevich V.V. Kontrol' i diagnostika v avtomatizirovannom proizvodstve/ V.V. Iurkevich// Mashinostroitel'. – 2003. – №2. –S.36-41.
6. Kozochkin M.P. Vibroakusticheskaya diagnostika pri tverdom tochenii/ M.P. Kozochkin, F.S. Sabirov, A.N. Popikov// Vestnik MGTU «Stankin». – 2009. – №1(5). – S. 23-29.
7. Safarbakov A.M. Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki: uchebnoe posobie/ A.M. Safarbakov, A.V. Luk'ianov, S.V. Pakhomov. – Irkursk: IrGUPS, 2006, –2016s.
8. Sharov E.T., Taranenko V.A. Sposob zashchity instrumenta ot peregruzok i ustroistvo dlia ego realizatsii// Avt. cvid. SU №1155421. Opubl. 15.05.86, Biul. №18.
9. Kanareev F.N., Mashin S.P. Rez'bonareznaia golovka// Avt. cvid. SU №1038129. Opubl. 12.03.83, Biul №28.
10. Kanareev F.N. Mekhanizm obrazovaniia pogreshnostei vnutrennikh rez'b malykh diametrov (M2...M6) za schet deformatsii krucheniiia metchikov/ F.N. Kanareev, T.V. Rezinkina// Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Tekhnologiya mashinostroeniia: problemy i perspektivy”. – Sevastopol', 2000. – S.25-28.
11. Gerts E.V. Dinamika pnevmaticheskikh sistem mashin / E. V. Gerts. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 256 s.

УДК 621.923.02

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНИСТОСТИ ПРИ КРУГЛОМ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ

Б.В. Богущкий¹, С.М. Братан¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В данной статье рассмотрен вопрос обеспечения заданной продольной волнистости при плоском круглом шлифовании. В работе проанализированы основные параметры процесса и их степень влияния на высоту волнистости. Особое внимание уделено разработке мероприятий по снижению высоты волнистости за счет уменьшения скорости вращения шлифовального круга. Выявлены и обоснованы ряд рекомендаций по планируемой обработке, предложены графические закономерности процесса образования. На основе проведенного исследования автором предлагается выделить степень влияния рассматриваемых факторов на процесс образования волнистости, и обратить внимание на правильную правку шлифовального круга. В статье представлены графические зависимости достаточные для описания процесса.

Ключевые слова: шлифование, волнистость, зернистость, износостойкость, шероховатость, дисбаланс инструмента, режимы шлифования, оптимизация.

PROVIDING THE LONGITUDINAL WAVINESS IN ROUND FLAT GRINDING

B.V. Bogutsky¹, S.M. Bratan¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

In the given article the question of maintenance of the given longitudinal waviness at flat round grinding is considered. The main parameters of the process and their degree of influence on the height of the undulation are analyzed. Particular attention was paid to the development of measures to reduce the height of the undulation due to the reduction in the speed of rotation of the grinding wheel. A number of recommendations on the planned treatment were revealed and justified, the patterns of the education process were revealed. On the basis of the research carried out by the author, it is proposed to distinguish the degree of influence of the factors under consideration on the process of formation of undulation, and pay attention to correct editing of the grinding wheel. The article presents all the main graphical dependencies sufficient for describing the process.

Keywords: grinding, corrugation, graininess, wear resistance, roughness, tool imbalance, grinding modes, optimization.

Введение. Обеспечение требований по продольной волнистости при плоском круглом шлифовании (в дальнейшем просто волнистость) представляет более сложную задачу. Это связано с тем, что её формирование обусловлено комплексом технологических факторов, степень влияния которых необходимо было уточнить для условий плоского шлифования инструментом из СТМ на металлической связке.

Предварительными исследованиями установлено[1-6], что из основных характеристик шлифовального круга зернистость

оказывает наибольшее влияние на волнистость (рис. 1).

При прочих равных условиях с уменьшением зернистости высота волнистости снижается и достигает значений $W_z=3.5$ мкм при шлифовании кругом с зерном 50/40. Следует отметить, что только при использовании этих кругов удастся получить показатели шероховатости обрабатываемой поверхности, удовлетворяющие требованиям.

Цель статьи – изучение влияния параметров плоского шлифования для обеспечения величин поперечной волнистости поверхности изделия.

Изложение основного материала

Опыт работы с мелкозернистыми кругами показывает, что в отличие от существующего мнения мелкозернистые круги на металлической связке обеспечивают работу в режиме преимущественного самозатачивания инструмента при обработке интересующих нас покрытий и ряда инструментальных сталей.

Изучаемые круги имеют более высокую износостойкость по сравнению с другим инструментом, обеспечивающим заданную шероховатость (рис. 2). Так, при режиме $V=35$ м/с, $S_{np}=10$ мм/мин, $S_n=1$ мм/ход, $t=0.03$ мм удельный расход алмазов мелкозернистых кругов на металлической связке в 2 раза выше, чем при использовании кругов на связке Б2-08 зернистостью 100/80. С ростом производительности шлифования в 3 раза различие возрастает в 10...15 раз.

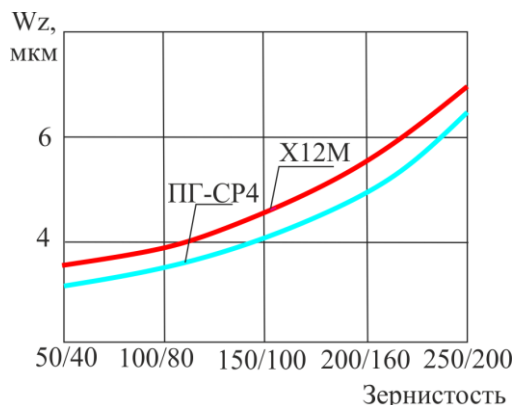


Рис. 1. Влияние зернистости инструмента на высоту волнистости

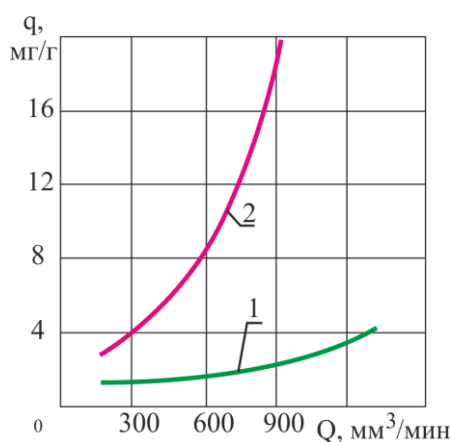


Рис. 2. Зависимость относительного расхода алмазов от производительности шлифования: 1 – связка М1-04; 2 – связка Б2-08

Мелкозернистые круги на металлической связке обеспечивают также возможность осуществления высокопроизводительного шлифования [7]. Например, при мощности привода главного движения станка 2,2 кВт, можно достигнуть скорости съема припуска порядка 1600 мм³/мин.

Изучение влияния режимов резания на продольную волнистость проводили кругами с характеристикой АС6 50/40М М1-04 100.

При постоянстве двух и варьировании третьим элементом режима, высота волнистости изменяется по степенной зависимости (рис. 3). Причем наибольший вклад в её снижение вносит глубина шлифования. С понижением последней (до 0,002 мм), а также продольной (до 3 м/мин) и поперечной (до 0,3 мм/ход) подач высота волнистости уменьшается до $2,5 \pm 3,0$ мкм.

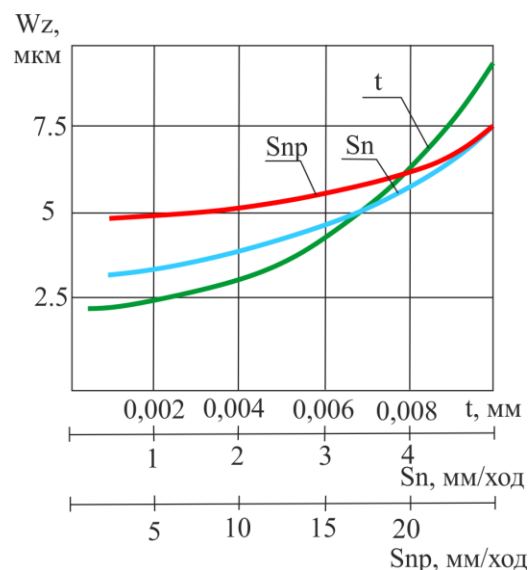


Рис. 3. Зависимость высоты волнистости от глубины шлифования, продольной и поперечной подач

Обработка на режиме отвечающему сочетанию предельно малых значений элементов, не приводит к существенному снижению высоты волнистости ($W_z=2.5$ мкм).

Дополнительными опытам установлено, что с точки зрения максимальной производительности обработки высота волнистости порядка 3 мкм обеспечивается на следующих режимах: $S_{np}=20$ мм/мин, $S_n=5$ мм/ход, $t=0.002$ мм, с использованием которых изу-

чили влияние окружной скорости вращения шлифовального круга.

При изменении в традиционных пределах, с изменением скорости вращения круга высота волнистости снижается примерно на 30 % ($W_z=2.0$ мкм). Однако при этом ухудшаются показатели шероховатости обработанной поверхности и износостойкости инструмента (рис. 4), что ограничивает нижний предел снижения скорости.

При выполнении дальнейших исследований особое внимание уделили разработке мероприятий по снижению высоты волнистости за счет уменьшения скорости вращения шлифовального круга при одновременном обеспечении требуемых показателей шероховатости обработанной поверхности и износостойкости режущего инструмента.

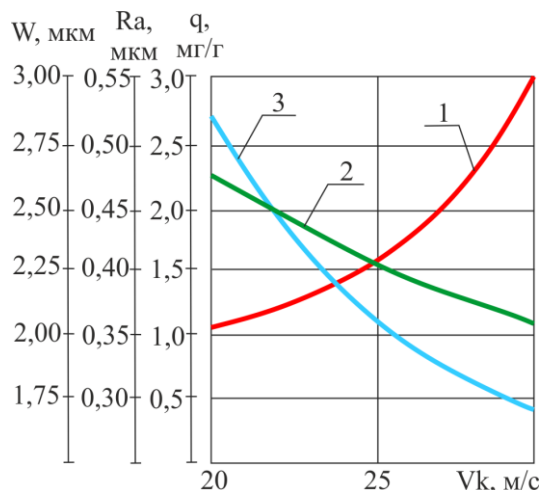
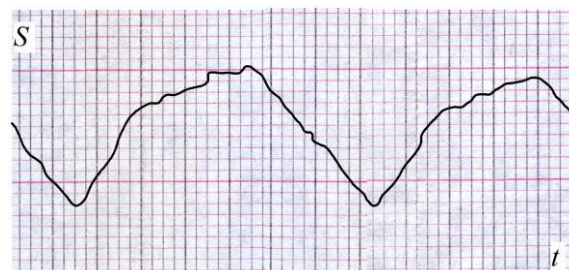


Рис. 4. Зависимость высоты волнистости (1), относительного расхода алмазов (2) и параметра шероховатости (3) от скорости вращения шлифовального круга

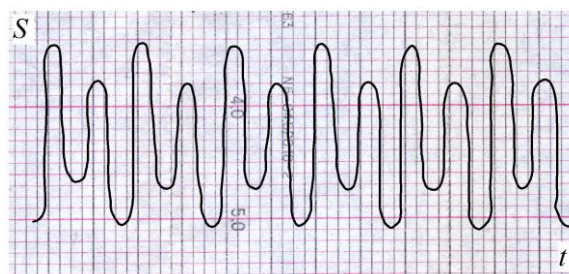
Из анализа волнограмм шлифованной поверхности и виброграмм колебаний оси шпинделя станка (рис. 5) можно заключить, что форма волнистости близка к синусоидальной с частотой равной частоте вращения шлифовального круга. При этом ось шпинделя совершает два вертикальных колебательных движения с различной амплитудой. Экспериментально определено, что амплитуда одного из них обусловлена дисбалансом инструмента, а другого — величиной радиального биения рабочей поверхности шлифовального круга.

Рассмотрено влияние точности балансировки на высоту волнистости [8, 9].

Установили, что высота волнистости существенно снижается с повышением точности балансировки до $1,5...2,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}$, а затем практически не изменяется (рис. 5, а). Аналогичные закономерности наблюдали и для показателя Ra шероховатости обработанной поверхности (рис. 5, б).



а)



б)

Рис. 5. Волнограмма обработанной поверхности (а) и соответствующая виброграмма процесса шлифования (б)

Поэтому при проектировании технологических процессов плоского шлифования инструментом из СТМ на металлической связке точность балансировки круга необходимо назначать в пределах $1,5...2,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}$. Балансировку круга желательно выполнять непосредственно на шлифовальном станке в связи с тем, что дисбаланс шпинделя станка обычно выше рекомендуемого [10].

Снизить величину радиального биения рабочей поверхности круга, а, следовательно, и высоту волнистости можно двумя путями: приработкой и правкой инструмента.

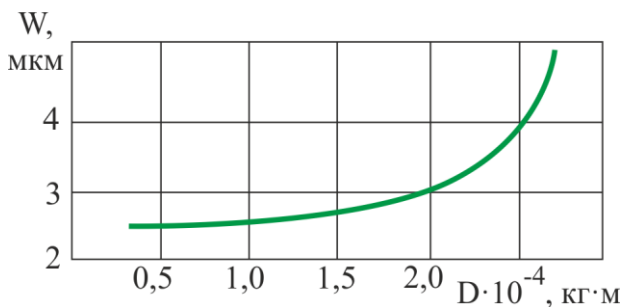
Приработкой даже на шадящих режимах резания не удастся снизить величину радиального биения ниже $15...20$ мкм, а высоту волнистости — ниже 2 мкм.

Более высокую точность можно получить, используя операцию правки инструмента.

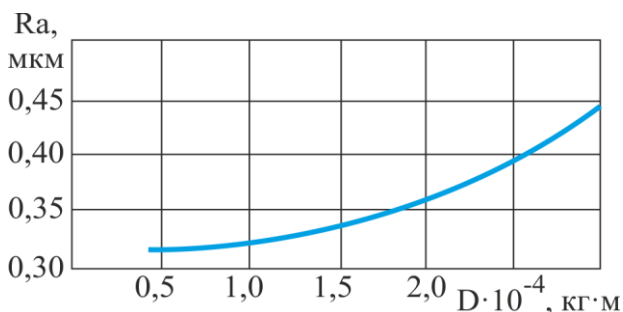
После выполнения правки практически всеми известными методами удалось полу-

чить минимальное значение радиального биения рабочей поверхности круга (5 мкм), когда правка осуществлялась кругом из карбида кремния зеленого, зернистостью 20, на керамической связке, средней мягкости. При этом скорость вращения правящего инструмента составляла 20 м/с, скорость вращения алмазного круга 1...2 м/с, поперечная подача 3 м/мин, подача на врезание 2 мкм.

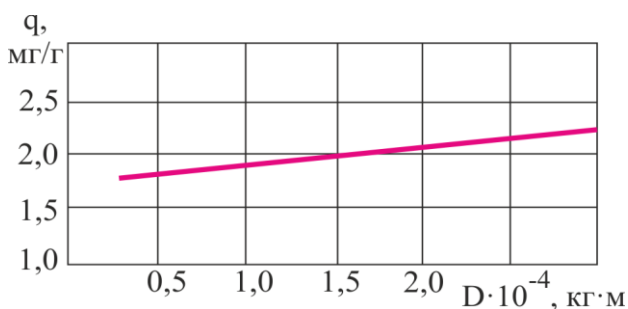
После такой правки удастся получить минимальную высоту волнистости ($W_z=0.7$ мкм), которая визуальна не наблюдается, а высота находится в пределах R_z .



а)



б)



в)

Рисунок 6. Зависимость высоты волнистости (а), шероховатости обработанной поверхности (б) и относительного расхода алмазов (в) от дисбаланса шлифовального круга

Достигнутые показатели в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к качеству обработки изучаемых деталей [11, 12].

В то же время введение операции правки инструмента обуславливает значительное повышение трудоемкости шлифования. Время, требуемое на правку, составляет приблизительно 30 мин. Кроме того, затруднено осуществление высокопроизводительного съема припуска за счет резкого снижения периода стойкости инструмента при интенсификации режимов резания (рис. 7). Так, при росте скорости съема припуска до 1000 мм³/мин период стойкости инструмента стремится к нулю.

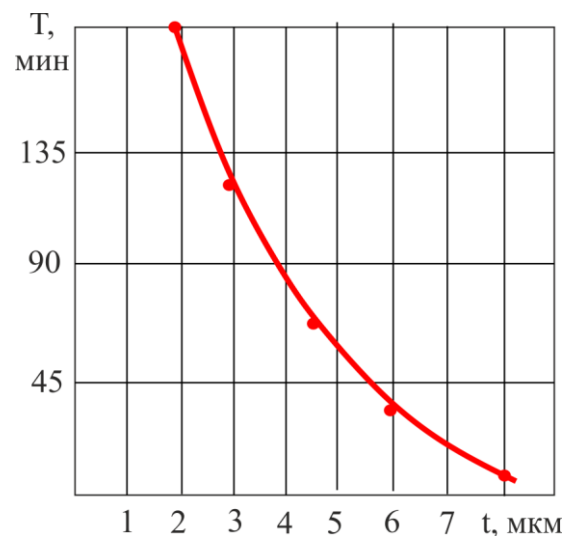


Рис. 7. Зависимость периода стойкости шлифовального круга от глубины резания

Полученные данные являются достаточными для разработки математического описания процесса образования волнистости и позволит найти более эффективные пути достижения требуемых значений высоты волнистости.

Выводы

Выявлено, что среди исследованных факторов наибольший вклад в снижение высоты продольной волнистости вносят зернистость шлифовального круга, а также точность его правки и балансировки.

Обнаружено, что с уменьшением зернистости круга высота волнистости снижается, достигая минимальных значений на зерне 50/40. Причем только с применением такого инструмента обеспечиваются требования по шероховатости обработанной поверхности для исследуемых деталей.

Показано, что применение динамической балансировки круга непосредственно на шлифовальном станке (с точностью $1,5 \cdot 10^{-4}$ кг·м) и операции правки инструмента (некруглость 5 мкм) позволяет снизить высоту волнистости до требуемых значений ($W_z=0.7 \pm 0,2$ мкм).

Констатируется, что из-за резкого снижения периода стойкости инструмента при повышении режимов резания, применение операции правки сдерживается невозможностью осуществления высокопроизводительного шлифования.

Список литературы

1. Новоселов Ю.К. Вычисление некоторых параметров шероховатости шлифованных поверхностей [Текст] / Ю.К. Новоселов, А.М. Красный // Технология и автоматизация машиностроения. 1977. – Вып. 20. – Киев. – С. 54–59.
2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке [Текст] / Ю.К. Новоселов – Изд-во: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 317 с.
3. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. В 2 ч. Ч. 1. Состояние рабочей поверхности абразивного инструмента [Текст] / А.В.Королев, Ю.К.Новоселов. – Саратов: Из-во Саратов. Ун-та, 1987. – 158 с.
4. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Из-во СевНТУ, 2012. – 304с.
5. И.Дрожалова, Ф.В. Седыкин, В.П.Смоленцев, В.М. Ямпольски: /Под р0д. В.П.Смоленцева. Т.И.-М.; Высшая школа, 1983, С.96-173.
6. Мороз И.И. и др. Электрохимическая обработка металлов /И.И.Мороз, Г, А. Алексеев, О.А.Водяницкий, Ю.С.Волков, Р.Б.Исакова, Б.В.Кузнецов, М.А. Моница.-: Машиностроение, 1969, – 206 с.
7. Подураев В.Н., Каналов В.С. Физико-химические методы обработки.- М.: Машиностроение, 1973, – 346 с
8. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке.- Саратов: Из-во Саратовск. ун-та, 1979, – 232 с
9. Новоселов Ю.К. Влияние режима шлифования и физико-механических свойств обрабатываемого металла на силы резания //Сборн. научн. трудов ВНИИАШ.-Л., 1973, № 14 –С.68-75.
10. Мицкевич В.Л. Влияние технологических факторов на чистоту поверхности при алмазном шлифовании //Станки и инструменты, 1971, – С.21-23.

11. Братан С.М., Сопин П.К., Харчин В.Л. Способ управления процессом электрохимической обработки. А.С.)§ 1646730 (СССР). – Оpubл. Б.И. № 17, 1990.
12. Gunwant DS, Harshal K.C, Deshmukh RR, Deshmukh SD (2012) Modeling and analysis of surface grinding for residual stresses in workpiece. International journal of mechanical engineering and technology, Vol. 3, Iss. 3: 344-34

References

1. Novoselov YU.K. Vychisleniye nekotorykh parametrov sherokhovatosti shlifovannykh poverkhnostey [Tekst] / YU.K. Novoselov, A.M. Krasnyy // Tekhnologiya i avtomatizatsiya mashinostroyeniya. 1977. - Vyp. 20. - Kiyev. - S. 54-59.
2. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke [Tekst] / YU.K. Novoselov - Izd-vo: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. - 317 s.
3. Korolev A.V. Teoretiko-veroyatnostnyye osno-vy abrazivnoy obrabotki. V 2 ch. CH. 1. Sostoyaniye ra-bochey poverkhnosti abrazivnogo instrumenta [Tekst] / A.V. Korolev, YU.K.Novoselov. - Saratov: Iz-vo Sa-rat. Un-ta, 1987. - 158 s.
4. Novoselov, YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke / YU.K. Novoselov. - Sevastopol': Iz-vo SevNTU, 2012. - 304s.
5. I.Drozhalova, F.V. Sedykin, V.P.Solentsev, V.M.Yampol'ski:: / Pod r0d. V.P.Smolentseva. TIM.; Vysshaya shkola, 1983, S.96-173.
6. Moroz I.I. i dr. Elektrokhimicheskaya obra-botka metallov / I.I.Moroz, G, A.Alekseyev, O.A.Vodyanitskiy, YU.S.Volkov, R.B.Isakova, B.V.Kuznetsov, M.A.Monina.-: Mashinostroyeniye, 1969, - 206 s.
7. Podurayev V.N., Kanalov V.S. Fiziko-khimicheskiye metody obrabotki.-M .: Mashinostroyeniye, 1973, - 346 s
8. 8. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke.- Saratov: Iz-vo Saratovsk. un-ta, 1979, - 232 s
9. Novoselov YU.K. Vliyaniye protsessov shlifovaniya i fiziko-mekhanicheskikh svoystv obrabatyvayemogo metalla na sily rezaniya // Sborn. nauchno. trudov VNIASH.-L., 1973, № 14-S.68-75.
10. 10. Mitskevich V.L. Vliyaniye tekhnologicheskikh protsessov na almaznom shlifovanii // Stanki i instrumenty, 1971, -S.21-23.
11. Bratan S.M., Sopin P.K., Kharchin V.L. Spo-sob upravleniya i elektrokhimicheskoy obra-botki. A.S.) § 1646730 (SSSR). - Opubl. B.I. № 17, 1990.
12. Gunwant DS, Harshal K.C, Deshmukh RR, Deshmukh SD (2012) Modelirovaniye i analiz poverkhnostnogo izmel'cheniya ostatochnykh napryazheniy v zagotovke. Mezhdunarodnyy zhurnal po mashinostroyeniyu i tekhnologii, Vol. 3, vyp. 3: 344-34.

УДК 621.923:

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.Е. Сидоров¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Статья посвящена моделированию формообразования отверстий при сверлении полимерных композиционных материалов, обладающих способностью эффективно гасить шумовой фон, сопровождающий работу турбоагрегатов, которые сейчас находят применение в современных самолетах, в перекачивающих агрегатах газокompрессорных станций. Наиболее эффективным методом получения отверстий в полимерных композиционных материалах является алмазное сверление, при котором съем материала, осуществляется за счет комбинации процессов микрорезания-скалывания и хрупкого объемного разрушения. Разработана математическая модель для расчета режимов резания при сверлении образцов из стеклопластика и углепластика.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, звукопоглощающие панели, алмазное сверление, производительность, себестоимость.

MODELING FORMING OF HOLES AT THE DRILLING OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

D.E. Sidorov¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to simulation of hole formation during drilling of polymeric composite materials, which have the ability to effectively suppress the noise background accompanying the operation of turbo-regattas, which are now used in modern airplanes and in pumping units of gas compressor stations. The most effective method of obtaining holes in polymeric composite materials is diamond drilling, in which the material is removed by a combination of microcutting-shearing processes and brittle volumetric fracture. A mathematical model has been developed for calculating the cutting regimes for drilling samples from fiberglass and carbon plastic.

Keywords: polymer composite materials, sound-absorbing panels, diamond drilling, productivity, cost.

Выпуск конкурентоспособной продукции машиностроительными предприятиями, заводами авиационной и космической отраслей неразрывно связан с расширением внедрения особого класса материалов – конструкционных композитов, обладающих повышенными, функционально ориентированными физико-механическими, теплофизическими, диэлектрическими и другими характеристиками [1].

Конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ) обладают способностью эффективно гасить шумовой фон, сопровождающий работу турбоагрегатов, которые сейчас находят применение в со-

временных самолетах, в перекачивающих агрегатах газокompрессорных станций. Шумопоглощение значительно повышается в случае, когда из ПКМ изготавливают сотовые ненаполненные двух или пятикамерные панели (рис.1).

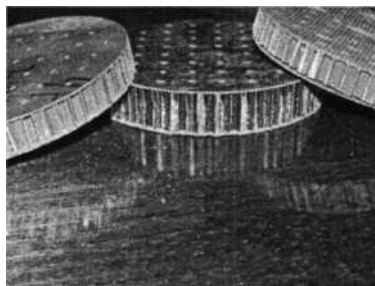


Рис.1. Сотовая панель

Благодаря этим свойствам, обычно из ПКМ (углепластиков марок КМУ-4э, КМУ-11э или стеклопластиков марок СВМ), изготавливают звукопоглощающие панели для авиадвигателей (например, ПС-90А2, ТД-117 и др.) [2].

Звукопоглощающие панели (ЗПП), ныне производятся серийно, имеют высокую стоимость, поскольку является нетехнологичными в изготовлении. Конструктивно ЗПП представляют собой однослойные, трехслойные или пятислойные оболочки сложной конфигурации, и выполняются в виде кожухов, обтекателей, диафрагм и др. ЗПП имеют значительное количество отверстий небольшого диаметра (около 1,6...2,0 мм), которые выполнены с шагом 10 мм x 10 мм по всей плоскости оболочки и предназначены для повышения шумопоглощающих свойств, и диаметром 6,5...10,0 мм, выполненных с обеспечением высокой точности к взаимному расположению и с выдержкой качественных размеров от комплекта технологических баз. Последние предназначены для крепления этих элементов к несущей системе самолета или установки дополнительных деталей и приспособлений.

Указанные отверстия традиционно получают сверлением алмазными инструментами или сверлами со специально заостренными кромками, либо прошивкой отверстий гидроабразивной струей (рис. 2). Последняя эффективна для однородных материалов, в случае обработки ПКМ картины дефектов могут быть разными: вспучивания, расслоение, водопоглощение.

При сверлении значительное количество отверстий ЗПП требует выполнения многоцикловых рабочих ходов инструмента. Кроме того, механическая обработка деталей из ПКМ сталкивается с рядом сложностей, например, выраженная анизотропия свойств и низкое адгезионное сцепление наполнителя в ЗПП обуславливают сложность получения высокого качества обработанной поверхности, ведут к появлению скалываний, расслоений и других дефектов, а отсутствие смазочно-охлаждающей жидкости в зоне резания делает необходимым ограничение

скоростей резания, в результате чего резко падает производительность обработки [3].

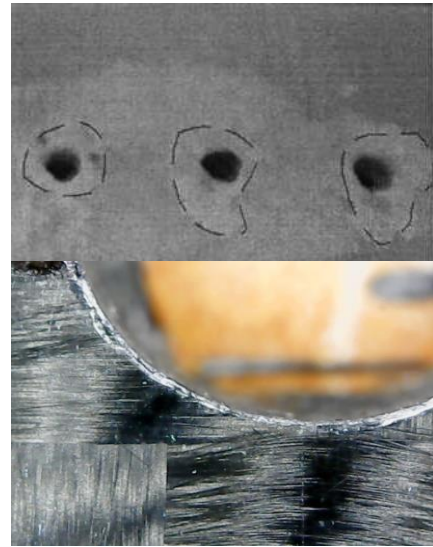


Рис.2. Дефекты при обработке отверстий в ПКМ

Повышение производительности обработки отверстий однозначно связано с интенсификацией режимов резания (подачи и скорости резания). Аналогичный путь может быть выбран и для снижения себестоимости обработки отверстий в композиционных материалах, который подтверждается целым рядом исследований [3-5]. Однако увеличение режимов обработки сопряжено с ростом износа сверл, приводящего к частой их смене и, как следствие, к снижению производительности и повышению себестоимости обработки [6].

Выполненный анализ современных исследований показывает, что наиболее эффективным методом получения отверстий в ПКМ является алмазное сверление, при котором съем материала, осуществляется за счет комбинации процессов микрорезания-скалывания и хрупкого объемного разрушения [7]. В известной литературе отсутствуют теоретические или экспериментальные зависимости, учитывающие вышеуказанные эффекты.

Построение такой зависимости является целью данной статьи. Установление таких зависимостей может оказать решающее значение для построения новых моделей управления процессом обработки.

Режимы резания для операций алмазного сверления рассчитываются путем разрешения уравнения баланса перемещений [7]:

$$S_y = \frac{dt_f}{d\tau} + \frac{Q_\Sigma}{d\tau} + \frac{dH}{d\tau} + \frac{dA_y}{d\tau},$$

где $Q_\Sigma = f(t_f)$ – интенсивность съема материала; H – износ инструмента; A_y – деформации в технологической системе.

При обработке хрупких материалов данное уравнение может быть решено только в том случае, если известны зависимости, описывающие съем материала, при комбинации процессов микрорезания-скалывания и хрупкого объемного разрушения.

Для получения математической модели, позволяющей рассчитывать съем материала при наличии процессов микрорезания-скалывания и хрупкого объемного разрушения, рассмотрим процесс взаимодействия инструмента с заготовкой на микроуровне (рис. 3).

Удаление материала в зоне контакта в результате воздействия микрорезания-скалывания и хрупкого объемного разрушения можно рассматривать как случайное событие, характеризуемое совместной вероятностью удаления материала заготовки хотя бы одним из вышеуказанных процессов.

Общая вероятность удаления определяется [7]:

$$P(M) = 1 - P_1(\bar{M}) \cdot P_2(\bar{M}), \quad (1)$$

где $P_1(\bar{M})$ – вероятность того, что материал не удален за счет микрорезания; $P_2(\bar{M})$ – вероятность того, что материал не удален за счет объемного хрупкого разрушения.

Это уравнение также может быть представлено в виде аналогичном в форме:

$$P(M) = 1 - e^{-a_0 - a_1(y, \tau) - a_2(y, \tau)}, \quad (2)$$

где a_0 – показатель, определяющий вероятность удаления материала на уровне y до входа поверхности в зону контакта детали со сверлом; $a_1(y, \tau)$ – показатель, определяющие изменение вероятности удаления материала в зоне контакта детали со сверлом за счет протекания процессов механического

резания; $a_2(y, \tau)$ – показатель, определяющие изменение вероятности удаления материала в зоне контакта детали со сверлом за счет протекания процессов хрупкого объемного разрушения; y – расстояние от наружной поверхности заготовки до рассматриваемого уровня; τ – текущий момент времени.

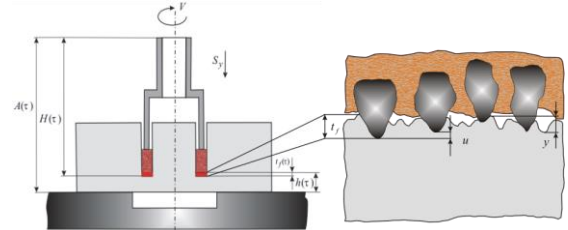


Рис. 3. Схема процесса алмазного сверления

Изменение Δa_1 при протекании процессов микрорезания для каждого оборота определяется выражением [8]:

$$\Delta a_1(y, \tau) = k_c b_3 \Delta \lambda, \quad (3)$$

где k_c – коэффициент стружкообразования; $b_3(y, \tau)$ – ширина зерна на уровне y ; $\Delta \lambda$ – число алмазных зерен, прошедших через единичное сечение.

Для условий алмазного сверления неметаллических материалов $k_c = 1$ [9]. В процессе сверления определенное количество зерен осуществляет микрорезание поверхности заготовки, а другая часть зерен непосредственно скалывает материал. Поэтому при расчете показателя a_1 , необходимо учитывать только те зерна, которые могут срезать материал, т.е. из общего числа зерен нужно вычесть зерна, производящие скалывание.

Тогда:

$$\Delta a_1(y, \tau) = b_3 \lambda (1 - P_{ck}), \quad (4)$$

где P_{ck} – вероятность скалывания материала заготовки при взаимодействии с зерном инструмента.

При аппроксимации профиля зерна степенной зависимостью получаем:

$$b_3 = C_b (t_f - y - u)^m, \quad (5)$$

где C_b , m – коэффициенты формы зерна; t_f – фактическая глубина микрорезания; u –

расстояние от условной наружной поверхности инструмента до вершины зерна.

Через единичное сечение $1 \cdot \Delta u \cdot \Delta \tau \cdot V_c$ проходит $\Delta \lambda$ зерен инструмента

$$\Delta \lambda = n_3 f(u) \Delta u V_c \Delta \tau, \quad (6)$$

где n_3 – количество зерен в единице объема рабочего слоя инструмента; V_c – окружная скорость инструмента; $f(u)$ – распределение рабочих зерен инструмента по координате u , которое может быть аппроксимировано зависимостью [10, 11]:

$$f(u) = C_h u^{\chi-1}, \quad (7)$$

где C_h – коэффициент, вычисляемый из условия равенства единице площади, ограниченной кривой распределения

$$C_h = \frac{\chi}{H_u^\chi}, \quad (8)$$

где H_u – величина слоя рабочей поверхности инструмента, в пределах которой подсчитывается n_3 .

После подстановки (5) и (6) в (4) и интегрирования по τ и по u , следует:

$$a_1(y, \tau) = n_3 C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} V_c \times \\ \times \int_{t_0}^t \int_0^{t_f-y} (t_f - y - u)^m u^{\chi-1} \times (1 - P_{ck}) du d\tau. \quad (9)$$

Вероятность скалывания P_{ck} определяется режимом сверления и расположения зерна в объеме инструмента. Для ее расчета могут быть использованы зависимости С.М. Братана [7], полученные при анализе процесса правки абразивного инструмента и позволяющие определить вероятность объемного разрушения зерен шлифовального круга. Процесс правки абразивных кругов в определенном смысле подобен процессу алмазного сверления. Однако данные зависимости сложны для практического использования. Поэтому желательно заменить их приближенными так, чтобы стало возможным аналитическое вычисление интеграла (9). Для этого может быть использованы данные работы [7], где на основе обработки

экспериментальных данных для расчета P_{ck} предложена зависимость

$$P_{ck} = P_0 \left[1 - \left(\frac{u}{t_f} \right)^\beta \right], \quad (10)$$

где P_0 – значение вероятности скалывания являющееся характеристикой конкретного материала; β – показатель степени зависящий от конкретных условий сверления. Указанные параметры зависимости (10) могут быть рассчитаны по методике [7]

Подставив (10) в (9), получим

$$a_1(y, z) = n_3 \kappa_c V_c C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} \int_{t_0}^t \int_0^{t_f-y} (t_f - y - u)^m u^{\chi-1} du d\tau - \\ - n_3 \kappa_c V_c C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} \int_{t_0}^t \int_0^{t_f-y} (t_f - y - u)^m u^{\chi-1} P_0 du d\tau + \\ + n_3 \kappa_c V_c C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} \times \\ \times \int_{t_0}^t \int_0^{t_f-y} (t_f - y - u)^m u^{\chi-1} \left[P_0 \left(\frac{u}{t_f} \right)^\beta \right] du d\tau. \quad (11)$$

Вычисляя интеграл (11) (на выходе зерен из зоны контакта), получим выражение:

$$a_1(y, \tau) = \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi V_c \Gamma(\chi) \Gamma(m+1) (t-t_0) (1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1) H_u^\chi} (t_f - y)^{m+\chi} + \\ + \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi V_c \Gamma(\chi+\beta) \Gamma(m+1) (t-t_0) P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1) H_u^\chi t_f^\beta} \times \\ \times (t_f - y)^{m+\chi+\beta}. \quad (12)$$

С учетом обозначений

$$A_1 = \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi V_c \Gamma(m+1) (t-t_0)}{H_u^\chi} (t_f - y)^{m+\chi}.$$

выражение (12) примет вид:

$$a_1(y, \tau) = A_1 \left[\frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} \times \right. \\ \left. \times (t_f - y)^\beta \right] \quad (13)$$

После каждого оборота значение y изменяется на величину съема Δr .

Отсюда с учетом (13) получено:

$$P_1(\bar{M}) = \exp \left[A_1 \left(\frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (t_f - y - \Delta r)^\beta \right) \right] \quad (14)$$

Вероятность удаления материала за счет объемного хрупкого разрушения согласно (2) запишется как

$$P_2(M) = 1 - e^{-a_2(y, \tau)}. \quad (15)$$

При протекании процесса хрупкого объемного разрушения ширина единичной риски b_x , как результат взаимодействия зерна инструмента с деталью, больше его фактической ширины b_3 .

Для аппроксимации b_x используется степенная зависимость:

$$b_x = C_{bx}(t_f - y - u + \Delta r_x)^{m_x}, \quad (16)$$

где Δr_x – величина приращения съема материала в процессе хрупкого разрушения.

Аналогично решению (6) – (13) можно получить показатель степени a_2 :

$$a_2(y, \tau) = A_2 \left(\frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x + \chi + 1)} - \frac{\Gamma(\chi + \beta)}{\Gamma(m_x + \chi + \beta + 1)t_f^\beta} \times \right. \\ \left. \times (t_f - y - \Delta r_x)^\beta \right), \quad (17)$$

где

$$A_2 = \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi V_c \Gamma(m_x + 1) P_0 (t - t_0)}{H_u^\chi} \times \\ \times (t_f - y - \Delta r_x)^{m+\chi}. \quad (18)$$

Что позволяет построить в соответствие с (15) выражение для вероятности неудаления материала при алмазном сверлении только за счет объемного хрупкого разрушения:

$$P_2(\bar{M}) = \exp \left[A_2 \left(\frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x + \chi + 1)} - \frac{\Gamma(\chi + \beta)}{\Gamma(m_x + \chi + \beta + 1)t_f^\beta} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (t_f - y - \Delta r_x)^\beta \right) \right]. \quad (19)$$

С учетом, что для наружной поверхности детали ($y=0$), $P(\bar{M}) = \beta_0$ при умножении $P_{1,2}(\bar{M}) = P_1(\bar{M}) \cdot P_2(\bar{M})$, получим зависимости вероятностей неудаления материала для схемы алмазного сверления:

$$1 - \beta_0 = \exp \left\{ -a_0 \left[A_1 \left(\frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \times (t_f - y - \Delta r)^\beta \right) \right] + \left[A_2 \left(\frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x + \chi + 1)} - \frac{\Gamma(\chi + \beta)}{\Gamma(m_x + \chi + \beta + 1)t_f^\beta} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (t_f - y - \Delta r_x)^\beta \right) \right] \right\}. \quad (20)$$

Далее после логарифмирования (20) получим:

$$\ln \frac{1}{1 - \beta_0} - a_0 = \left\{ \left[A_1 \left(\frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \times (t_f - y - \Delta r)^\beta \right) \right] + \left[A_2 \left(\frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x + \chi + 1)} - \frac{\Gamma(\chi + \beta)}{\Gamma(m_x + \chi + \beta + 1)t_f^\beta} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (t_f - y - \Delta r_x)^\beta \right) \right] \right\}. \quad (21)$$

Выражения (21) позволяет найти величину съема материала Δr для схемы алмазного сверления неметаллических материалов. Для решения рассмотренных уравнений необходимо знать величину приращения съема Δr_x , за счет хрупкого разрушения в процессе развития микротрещин в поверхностном слое. Определение значений Δr_x осуществлялось моделированием процесса трещинообразования методом конечных элементов в среде IS-DAYNA, подробные результаты исследований приведены в литературе [12].

Разработанная модель была использована при расчете режимов резания при сверлении образцов из стеклопластика (а) и углепластика С-49 (б) (рис. 4).

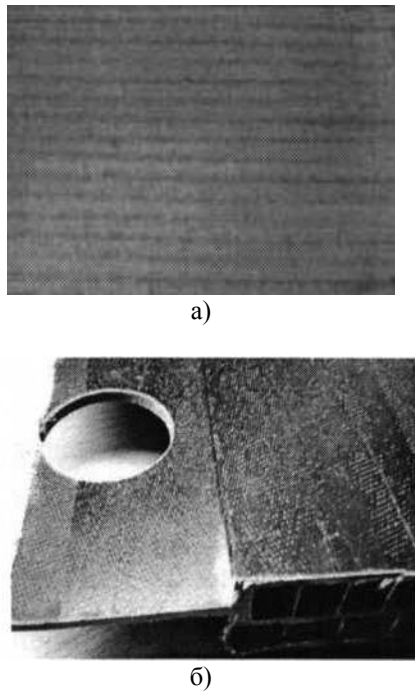


Рис. 4. Фрагменты обрабатываемых заготовок – листовых и сотовых из стеклопластика (а) и углепластика С-49 (б)

Управление производительностью и себестоимостью обработки связано с интенсификацией режимов резания; режимы резания связаны с величиной предельного износа инструмента и скоростью его износа; износ инструмента в свою очередь связан с вибрациями в технологической системе; предельный износ, как правило, сопровождается потерей устойчивости процесса обработки. Указанные взаимосвязи позволяют предположить, что, изменяя режимы резания в процессе обработки, можно смещать величину предельного износа в сторону больших его значений, а контроль достижения предельного износа можно с высокой степенью точности увязать с потерей устойчивости процесса. Кроме того, так как виброустойчивость технологической системы ссылается теоретическим расчетам, то возникает возможность определения величины предельного износа инструмента без проведения дорогостоящих и трудоемких стойкостных испытаний. В разработке такой теории и в создании новой системы управления процессами обработки заключается одна из задач дальнейших исследований.

Список литературы

1. Мэттьюз Ф. Композитные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. - М.: Техносфера, 2004. – 408с.
2. Ярославцев В.М. Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов / В.М. Ярославцев // Вестник МГТУ. Серия Машиностроение. Спец. выпуск «Композиционные материалы, конструкции и технологии», 2005. – С. 41-62.
3. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А.А.Степанов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 176с.
4. Ярославцев В. М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов / В.М.Ярославцев. – Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2012. – С. 1-24.
5. Кристер Рих. Новый виток развития обработки композитов/ Рих Кристер // METALWORKING WORLD. Деловой и технический журнал от SANDVIK COROMANT. – 2010. – № 1. – С.12-13.
6. Рычков Д.А. Выбор производственных критериев, значимых при оценке эффективности применения режущего инструмента для обработки композиционных материалов / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // В сборнике: Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. – Тамбов, 2014. – С. 131-132.
7. Братан С. М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования. - Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения, – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2006. – 321с.
8. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
9. Bratan S. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials / S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Kolesov, B. Bogutsky. - MATEC Web of Conferences, vol. 129, 01079 (2017) DOI: 10.1051/matecconf/201712901079.
10. Bratan S. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process / S. Bratan, A.Kolesov, S. Roshchupkin, T. Stadnik. – MATEC Web of Conferences, vol. 129, 01078 (2017) DOI: 10.1051/matecconf/201712901078.
11. Novoselov Yu. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear / Yu.

Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky // *Procedia Engineering*. –2016. – Vol. 150. – Pp. 809-814.

12. Рощупкин С.И. Сверление отверстий в хрупких неметаллических материалах: монография/ С.И. Рощупкин, С.М.Братан. – Симферополь, ДИАЙПИ, 2015. -160 с.

References

1. Mett'yuz F. Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya / F. Mett'yuz, R. Rolings. - M.: Tekhnosfera, 2004. – 408s.
2. Yaroslavcev V.M. Tekhnologicheskie resheniya problem obrabotki raketnyh i aerokosmicheskikh konstrukcij iz kompozicionnyh materialov / V.M. Yaroslavcev // *Vestnik MGTU. Seriya Mashinostroenie. Spec. vypusk «Kompozicionnye materialy, konstrukcii i tekhnologii»*, 2005. – S. 41-62.
3. Stepanov A.A. Obrabotka rezaniem vysokoprochnnyh kompozicionnyh polimernykh materialov / A.A.Stepanov. – L.: Mashinostroenie, 1987. – 176s.
4. Yaroslavcev V. M. Vysokoeffektivnye tekhnologii obrabotki izdelij iz kompozicionnykh materialov / V.M.Yaroslavcev. – Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie, 2012. – S. 1-24.
5. Krister Rih. Novyj vitok razvitiya obrabotki kompozitov/ Rih Krister // *METALWORKING WORLD. Delovoj i tekhnicheskij zhurnal ot SANDVIK COROMANT*. – 2010. – № 1. – S.12-13.
6. Rychkov D.A. Vybor proizvodstvennykh kriteriev, znachimyh pri ocenke effektivnosti primeneniya rezhushchego instrumenta dlya obrabotki kompozicionnykh materialov / D.A. Rychkov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov // *V sbornike: Nauka, obrazovanie, obshchestvo: problemy i perspektivy razvitiya sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. – Tambov, 2014. – S. 131-132.
7. Bratan S. M. Tekhnologicheskie osnovy obespecheniya kachestva i povysheniya stabil'nosti vysokoproizvoditel'nogo chistovogo i tonkogo shlifovaniya. - Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk po special'nosti 05.02.08 – Tekhnologiya mashinostroeniya, – Odesskij nacional'nyj politekhnicheskij universitet, Odessa, 2006. – 321s.
8. Novoselov Yu.K. Dinamika formoobrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke / Yu.K. Novoselov. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – 304 s.
9. Bratan S. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials / S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Kolesov, B. Bogutsky. - *MATEC Web of Conferences*, vol. 129, 01079 (2017) DOI: 10.1051/mateconf/201712901079.
10. Bratan S. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process / S.Bratan, A.Kolesov, S. Roshchupkin, T. Stadnik. – *MATEC Web of Conferences*, vol. 129, 01078 (2017) DOI: 10.1051/mateconf/201712901078.
11. Novoselov Yu. Analysis of Relation between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear / Yu. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky // *Procedia Engineering*. –2016. – Vol. 150. – Pp. 809-814.
12. Roshchupkin S.I. Sverlenie otverstij v hrupkih nemetallicheskih materialah: monografiya/ S.I. Roshchupkin, S.M.Bratana. – Simferopol', DIAJPI, 2015. -160 s.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №4(12) 2018

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (05.02.07)
- Технология машиностроения (05.02.08)
- Металлургия и материаловедение (05.16.00)

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163

<http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Вестник современных технологий» обязательна.

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.
