

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в
машиностроении 2020» (7 – 11 сентября 2020 года)*

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)
ГЛЕЗЕР А. М.	д. ф-м. н, проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
БУРНАШОВ 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)
МАЛЫШЕВА Г.В.	д. т. н., проф. (г. Москва)
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)
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

Харченко А.О., Харченко А.А., Владецкая Е.А. Определение статистических параметров технической системы при моделировании и анализе	4
Братан С.М., Стадник Т.В. Оценка эффективности смазочно-охлаждающих технологических сред при ленточном шлифовании длинномерных изделий из титановых сплавов	10
Бохонский А.И., Варминская Н.И. Стабилизация частоты собственных колебаний при изменении геометрии упругой телескопической руки манипулятора	19
Братан С.М., Рощупкин С.И., Часовитина А.С. СОТС при шлифовании деталей из керамики и ситаллов	24
Тараховский А.Ю., Даньков А.В. Анализ CAD/CAM/CAE систем с точки зрения проектирования и расчета пресс-форм	32
Фарниев А.С., Новиков П.А. Анализ свойств материалов, используемых в аддитивных технологиях, и особенности их влияния на формирование внутренних резьб	42
Дуюн Т.А., Пчелкин В.М., Дуюн И.А. Прогнозирование износа режущего инструмента при точении жаропрочных, нержавеющей сталей ..	47
Саса Д.А., Тараховский А.Ю. Использование многофункционального измерительного манипулятора для контроля параметров получаемых после механической обработки	54
Левченко Е.А., Покинтелица Н.И., Колесов А.Г. Исследование теплофизических явлений процесса абразивной разрезки	60

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

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)
GLEZER A.M.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHOV 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)
MALYSHEVA G.V.	D.Sc., Prof. (Moscow)
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)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAKUBOV F.YA.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

CONTENTS

Kharchenko A.O., Kharchenko A.A., Vladetskaya E.A. Determination of statistical parameters of a technical system during simulation and analysis	4
S.M. Bratan, T.V. Stadnik Evaluation of effectiveness of cutting fluids for belt grinding of long-length products of titanium alloys	10
Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I. Stabilization of the eigentone frequency when the geometry of the elastic telescopic manipulator arm is changing	19
Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chasovitina A.S. The cutting fluids for grinding ceramics and sital parts	24
Tarakhovskiy A.Yu., Dankov A.V. Analysis of CAD / CAM / CAE systems in terms of design and calculation of molds	32
Farniev A.S., Novikov. P.A. Analysis of the properties of materials used in additive technologies and the peculiarities of their influence on the formation of internal threads	42
Duyun T.A., Pchelkin V.M., Duyun I.A. Predicting cutting tool wear when turning heat-resistant, stainless steels	47
Sasa D.A., Tarakhovskiy A.Yu., Balakin A.I. Use of the multi-functional measuring manipulator to control the parameters obtained after mechanical processing	54
Levchenko E.A., Pokintelitsa N.I., Kolesov A.G. Research of thermophysical phenomena in the abrasive cutting process	60

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 621. 01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ И АНАЛИЗЕ

А.О. Харченко¹, А.А. Харченко¹, Е.А. Владецкая¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г.Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрена методика оценки требуемого объема выборки, обеспечивающего надежное определение статистических параметров технической системы. Представлены материалы научно-методических и программных разработок, выполненные для расчетов при моделировании и анализе технологических, автотранспортных и других стохастических систем автоматического управления при решении научно-технических задач. Это позволяет упростить процедуру имитационного моделирования стохастических процессов и обеспечить надежную оценку требуемого объема выборки на основании допустимой погрешности модели.

Ключевые слова: оценка, требуемый объем выборки, относительное приращение математического ожидания, уравнение Лапласа, погрешность вычисления дисперсии.

DETERMINATION OF STATISTICAL PARAMETERS OF A TECHNICAL SYSTEM DURING SIMULATION AND ANALYSIS

A.O. Kharchenko¹, A.A. Kharchenko¹, E.A. Vladetskaya¹¹ FSFAEI HE «Sevastopol state university», Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article discusses a methodology for assessing the required sample size, which ensures reliable determination of the statistical parameters of a technical system. The paper presents the materials of scientific, methodological and software developments made for calculations in the modeling and analysis of technological, motor transport and other stochastic automatic control systems when solving scientific and technical problems. This makes it possible to simplify the procedure for simulation modeling of stochastic processes and to provide a reliable estimate of the required sample size based on the permissible model error.

Keywords: estimation, required sample size, relative increment of mathematical expectation, Laplace equation, variance calculation error.

При анализе стохастических процессов одной из актуальных является оценка требуемого объема выборки, обеспечивающего надежное определение статистических параметров технической системы. Наиболее важным из параметров можно считать математическое ожидание, которое входит в выражение многих статистических законов распределения.

По существующему определению [1,2,3,4] математическое ожидание $m_x(t)$ дискретно распределенной случайной величины X можно оценить, имея выборку, состоящую из n элементов:

$$m_x(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где x_i – значение случайной величины в момент времени t_i ($x_i = x(t_i)$). В упрощенной форме выражение математического ожидания записывают в виде $m_x(t) = M[X(t)]$ как начальный момент первого порядка [1].

Приведенное выражение позволяет вычислить математическое ожидание $m_x(t)$ с некоторой погрешностью. Объем выборки n (число реализаций) случайной

величины x_i определяет погрешность, с которой может быть получена оценка математического ожидания $m_x(t)$. С увеличением n погрешность оценки математического ожидания уменьшается.

Получить точное значение требуемого объема выборки не представляется возможным по причине случайного характера изменений самой величины x . Однако можно найти значение $m_x(t)$ с погрешностью, не превышающей заданного значения, с некоторой доверительной вероятностью P_x . Для решения этой задачи необходимо иметь реализацию, анализ которой позволяет получить желаемый результат [1, 2, 5]. Это предполагает применение итерационной процедуры, в процессе которой необходимо задать объем выборки, вычислить математическое ожидание и дисперсию статистической совокупности, затем уточнить параметры с новым массивом данных до тех пор, пока не будет обеспечена требуемая точность.

Приведены научно-методические и программные разработки, выполненные в Севастопольском государственном университете (СевГУ) для расчетов при моделировании и анализе технологических [6, 7], автотранспортных [8] и других стохастических систем автоматического управления при решении задач учебного и научного характера.

Цель приведенных в статье материалов – упрощение процедуры оценки требуемого объема выборки, исключаящее итерационный метод решения задачи при моделировании и анализе.

Для нахождения оценки требуемого объема выборки при заданном значении погрешности необходимо определить текущую оценку математического ожидания, которая может быть вычислена рекуррентно на основе его предыдущего значения как:

$$m_k = \frac{(k-1)m_{k-1} + x_k}{k}, \quad (1)$$

$$m_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i$$

где m_k – оценка математического ожидания; k – объем выборки, x_k – k -й элемент выборки; m_{k-1} – оценка математического ожидания на предыдущем шаге (для объема выборки, равного $k-1$).

Абсолютное значение относительной погрешности δ математического ожидания на очередном шаге k определим как:

$$\delta = \left| \frac{m_k - m_{k-1}}{m_0} \right|,$$

где m_0 – истинное значение математического ожидания. Подставив в правую часть значение m_k из формулы (1), после преобразований получим:

$$\delta = \left| \frac{m_{k-1} - x_k}{m_0 k} \right|.$$

Исключив слагаемое x_k , найдем максимально возможное значение погрешности:

$$\delta \leq \left| \frac{m_{k-1}}{m_0 k} \right|.$$

Так как предельные значения $m_k \rightarrow m_0$ и $m_{k-1} \rightarrow m_0$, то для больших значений k можно принять:

$$\delta \leq \frac{1}{k}, \quad (2)$$

где k представляет собой требуемый объем выборки.

Таким образом, по заданной погрешности δ в соответствии с (2) можно оценить требуемый объем выборки, положив $k = n$:

$$n = 1/\delta, \quad (3)$$

так как при росте числа реализаций значение математического ожидания существенно изменяться не будет, оставаясь в пределах погрешности δ .

На рис. 1 изображен для примера процесс изменения математического ожидания M_x при изменении объема выборки для

равномерного закона распределения случайной величины в диапазоне $[a, b]$; $a = 30$; $b = 150$. Теоретическая (истинная) величина математического ожидания [1,2] составляет

$$M_o = \frac{a+b}{2} = 90.$$

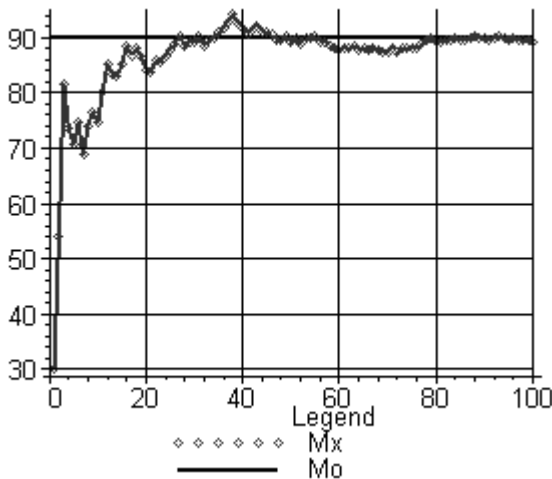


Рис. 1. Изменение математического ожидания M_x при изменении объема выборки k ($k = [1, n]$)

На рис. 2 изображен график границы погрешности GM_o , построенный по формуле (2) при переменной k , изменяющейся в диапазоне $[1, n]$. Для заданного уровня допустимой погрешности $\delta_{\max} = 0,01$ величина объема выборки принята в соответствии с формулой (3) равной $n = 100$. График GM_x изображает относительные приращения математического ожидания $(M_k - M_{k-1})/M_o$, где M_o – теоретическое значение математического ожидания, при увеличении текущего объема выборки k ($k = [1, n]$).

Как видно из графиков, кривая изменения относительного приращения математического ожидания GM_x не выходит за пределы границы (кривая GM_o), рассчитанной по формуле (2), что обеспечивает высокую достоверность результата определения требуемого объема выборки (4) при заданной погрешности δ оценки математического ожидания статистической совокупности.

Для проверки корректности полученной оценки объема выборки (3) определим необходимый ее объем, учитывающий параметры статистической совокупности [1,2,4]:

$$N = \frac{t_x^2 D_x N_x}{\Delta_x^2 (N_x - 1) + t_x^2 D_x}, \quad (4)$$

где N_x , D_x , M_x – объем, дисперсия и математическое ожидание статистической совокупности соответственно, $\Delta_x = \delta M_x$, t_x – корень уравнения Лапласа:

$$P_x = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{t_x} \exp(-x^2/2) dt,$$

$P_x = P\{|M_x - M_o| < \Delta_x\}$ – вероятность выполнения условия $|M_x - M_o| < \Delta_x$, M_o – истинное значение математического ожидания статистической совокупности.

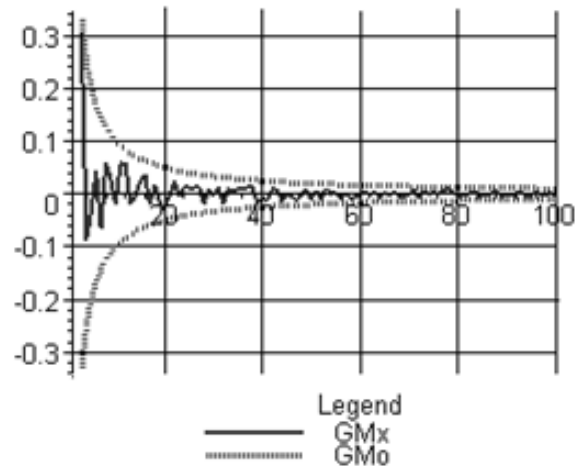


Рис. 2. Изменение относительного приращения математического ожидания при изменении объема выборки k

Значение t_x , входящее в выражение (4), получается как результат решения уравнения Лапласа в форме:

$$P_x = \text{erf}(t_x / \sqrt{2}). \quad (5)$$

Представим уравнение (4) в виде:

$$N = \frac{N_x}{1 + K_x},$$

где $K_x = \frac{\delta^2 M_x^2 (N_x - 1)}{D_x t_x^2}$ – коэффициент, и

упростим его, положив $\delta = 1/N_x$ ($N_x \gg 1$) в соответствии с формулой (3). Тогда выражение для K_x сведется к виду:

$$K_x = \frac{M_x^2}{D_x t_x^2 N_x}.$$

Приняв максимально допустимое значение вероятности $P_x = 1$, и решив уравнение Лапласа (5), получим значение $t_x^{-2} = 0,0041$. В большинстве практических случаев $N_x \gg 1$ и $\delta \ll 1$, что позволяет уравнение (4) свести к неравенству:

$$N \leq N_x. \quad (6)$$

Для распределения Вейбулла $M_x = 0$ и коэффициент $K_x = 0$. Поэтому объем выборки, гарантирующий погрешность не более δ , принятую в соответствии с формулой (3), составляет $N = n$, что получается в результате замены $N_x = n$ в формуле (6).

Для экспоненциального распределения отношение $M_x^2/D_x = 1$ и величина коэффициента $K_x > 0,0041/N_x$, что позволяет принять объем выборки по формуле (3), обеспечивающий значение математического ожидания с погрешностью не более δ , равный $N = n$.

Можно показать, что для равномерного закона распределения коэффициент $K_x > 0,011/N_x$ в стандартном интервале изменения случайной величины $[0,1]$, что позволяет принять объем выборки $N = n$, обеспечивающий требуемую точность определения ее математического ожидания.

Полученная оценка погрешности является состоятельной, несмещенной и эффективной [1, 2, 4], что является следствием предложенного хода доказательства.

Таким образом, применение формулы (3) при анализе случайной последовательности гарантирует получение достоверной оценки математического ожидания стохастической модели воздействия с заданной точностью

при выборе объема выборки n , равном величине $n = \delta^{-1}$.

Необходимо отметить, что можно решать и обратную задачу определения погрешности δ оценки математического ожидания при известном объеме выборки n с высокой степенью достоверности, определяемой доверительной вероятностью:

$$P(m_0 - \delta < m_x < m_0 + \delta) = 1,$$

где m_0 – истинное; m_x – искомое значение математического ожидания.

В некоторых случаях представляет интерес динамика процесса изменения дисперсии с ростом объема выборки. Известно [1,2,3], что погрешность вычисления дисперсии уменьшается с ростом объема выборки. На рисунке 3 изображен график изменения дисперсии D_x при изменении объема выборки k ($k = [1, n]$) и нанесено теоретическое значение дисперсии $D_0 = 1200$ для данных предыдущего примера.

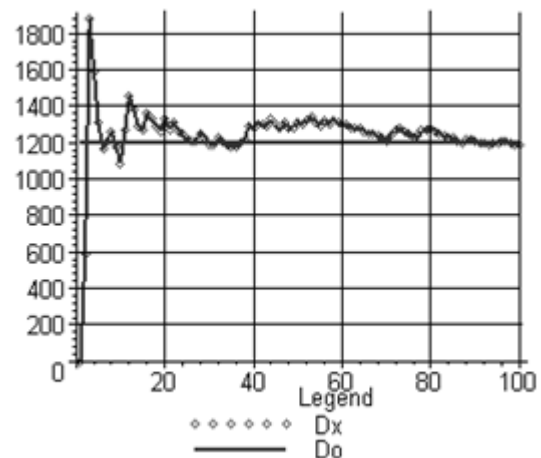


Рис. 3. Изменение дисперсии при изменении объема выборки ($k = [1, n]$)

Найдем изменение дисперсии за один шаг, обозначив:

$$\Delta D_k = D_{k+1} - D_k, \quad (7)$$

где $D_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^2 - m_k^2$ – дисперсия

выборки, состоящей из k элементов x_i ($i = 1 \dots k$);

$$D_{k+1} = \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^{k+1} x_i^2 - m_{k+1}^2 - \text{дисперсия}$$

выборки, содержащей $k+1$ элементов x_i ($i=1...k+1$);

$$m_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i - \text{математическое ожидание}$$

выборки из k элементов;

$$m_{k+1} = \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^{k+1} x_i - \text{математическое}$$

ожидание выборки из $k+1$ элементов.

Выполнив подстановку, получим:

$$\Delta D_k = \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^{k+1} x_i^2 - m_{k+1}^2 - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^2 + m_k^2.$$

Представив

$$D_{k+1} = \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^k x_i^2 + \frac{1}{k+1} x_{k+1}^2 - m_{k+1}^2, \quad \text{после}$$

преобразований найдем:

$$\Delta D_k = \frac{1}{k+1} \left(x_{k+1}^2 - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^2 \right) + m_k^2 - m_{k+1}^2. \quad (8)$$

Преобразуем выражение (8), разложив разность квадратов математических ожиданий:

$$m_k^2 - m_{k+1}^2 = (m_k - m_{k+1})(m_k + m_{k+1}). \quad (9)$$

Преобразуем разность математических ожиданий:

$$m_k - m_{k+1} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i - \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^k x_i - \frac{1}{k+1} x_{k+1}.$$

Сгруппировав слагаемые, получим:

$$m_k - m_{k+1} = \frac{1}{k(k+1)} \sum_{i=1}^k x_i - \frac{1}{k+1} x_{k+1}.$$

Учитывая, что $m_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i$, найдем:

$$m_k - m_{k+1} = \frac{1}{k+1} (m_k - x_{k+1}).$$

Подставив выражение в (9), а результат – в (8), получим:

$$\Delta D_k = \frac{1}{k+1} \left[(m_k + m_{k+1})(m_k - x_{k+1}) - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^2 + x_{k+1}^2 \right]$$

Упростив выражение, исключив конечный элемент выборки и приняв $m_{k+1} = m_k$,

найдем:

$$\Delta D_k \leq \frac{1}{k} \left(2m_k^2 - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^2 \right).$$

$$\text{Имея в виду, что } D_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^2 - m_k^2,$$

приведем последнее выражение к окончательной форме для вычисления абсолютного значения относительной

погрешности $\varepsilon_k = \left| \frac{\Delta D_k}{D_k} \right|$ на k -м шаге:

$$\varepsilon_k \leq \frac{1}{k} \left| \frac{D_k - m_k^2}{D_k} \right|.$$

При оценке дисперсии выборки с числом элементов n абсолютное значение границы относительной погрешности определения дисперсии D_n не превосходит величины:

$$\varepsilon_n \leq \frac{1}{n} \left| 1 - m_n^2 / D_n \right|, \quad (10)$$

где m_n и D_n – математическое ожидание и дисперсия выборки соответственно.

Следует отметить, что при удовлетворении условия $1 \gg m_n^2 / D_n$, выражение погрешности (10) упрощается до вида:

$$\varepsilon_n \approx 1/n. \quad (11)$$

На рис. 4 изображены кривые, иллюстрирующие зависимости (7), (10), (11). Жирной сплошной линией нанесена кривая, соответствующая границе погрешности (10). Кривая, соответствующая упрощенной зависимости (11), нанесена штриховой линией. Относительное изменение приращений дисперсии (7) обозначено D_x .

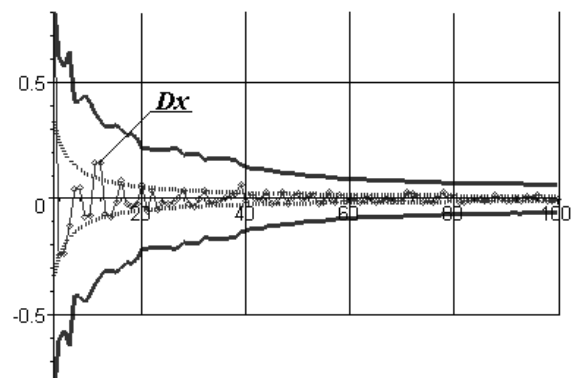


Рис. 4. Изменение относительного приращения дисперсии $D_x = (D_k - D_{k-1}) / D_0$ при изменении объема выборки k ($k = [1, n]$)

В результате имитационного моделирования при значениях $\delta = 0,01$; $n=100$ для выборки случайных величин с равномерным законом распределения и параметрами $a=30$; $b=150$ при теоретических значениях математического ожидания $M_o=90$ и дисперсии $D_o=1200$ вычисленные параметры распределения составили $M_x=89,25$ и $D_x=1187$.

Вычисленное по формуле (4) значение N совпало со значением, полученным по формуле (3) и составило $N=n=100$, что свидетельствует об эффективности рассмотренного метода. Предложенный метод позволяет непосредственно оценить требуемый объем выборки без вычисления ее статистических параметров.

Применение изложенного метода не требует априорной информации о характере случайного распределения и его параметрах, что существенно упрощает благодаря его универсальности процедуру имитационного моделирования стохастических процессов, обеспечивая надежную оценку требуемого объема выборки на основании допустимой погрешности модели.

Полученные результаты могут найти применение при моделировании и анализе технологических [7,8,9], автотранспортных, радиотехнических и других стохастических систем автоматического управления.

Список литературы

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.
2. Гнеденко Б.В., Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 546 с.
3. Капур К., Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 608 с.
4. Маригодов В.К. Теория и практика научных исследований / В.К. Маригодов, Г.А. Тихонов. – Севастополь: СевНТУ, 2007. – 247 с.
5. Колесов Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 224 с.
6. Методические указания к выполнению практических работ и тестированию по дисциплине «Надежность технологических машин и систем»

/ Сост. А.О. Харченко, В.П. Долгин, О.В. Хромов, Е.А. Владетская. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – 24 с.

7. 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.
8. Долгин В.П. Надежность автотранспортных средств. Практикум / В.П. Долгин, А.О. Харченко, О.В. Хромов. – К.: Кондор-Издательство, 2014. – 251 с.
9. Долгин В.П. Надежность технических систем / В.П. Долгин, А.О. Харченко. – М: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 167 с.

References

1. Venttsel' Ye.S. Teoriya veroyatnostey (Probability Theory) / Ye.S. Venttsel'. – M.: Vysshaya shkola, 1999. – 576 s.
2. Gnedenko B.V., Matematicheskiye metody v teorii nadezhnosti (Mathematical methods in the theory of reliability) / B.V. Gnedenko, YU.K. Belyayev, A.D. Solov'yev. – M.: Nauka, 1965. – 546 s.
3. Kapur K., Nadezhnost' i proyektirovaniye system (Reliability and system design) / K. Kapur, L. Lamberson. – M.: Mir, 1980. – 608 s.
4. Marigodov V.K. Teoriya i praktika nauchnykh issledovaniy (Theory and practice of scientific research) / V.K. Marigodov, G.A. Tikhonov. – Sevastopol': SevNTU, 2007. – 247 s.
5. Kolesov Yu.B. Modelirovaniye sistem. Dinamicheskiye i gibridnyye sistemy (Modeling systems. Dynamic and hybrid systems) / Yu.B. Kolesov, YU.B. Senichenkov. – SPb.: BKHV-Peterburg, 2006. – 224 s.
6. Metodicheskiye ukazaniya k vypolneniyu prakticheskikh rabot i testirovaniyu po distsipline «Nadezhnost' tekhnologicheskikh mashin i sistem» (Reliability of technological machines and systems) / Sost. A.O. Kharchenko, V.P. Dolgin, O.V. Khromov, Ye.A. Vladetskaya. – Sevastopol': SevNTU, 2013. – 24 s.
7. Bratan S.M. Avtomaticheskoye upravleniye protsessami mekhanicheskoy obrabotki: uchebnik (Automatic control of machining processes) / S.M. Bratan, Ye.A. Levchenko, N.I. Pokintelitsa, A.O. Kharchenko. – M: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 228 s.
8. Dolgin V.P. Nadezhnost' avtotransportnykh sredstv. Praktikum (Vehicle reliability. Practice) : ucheb. posobiye / V.P. Dolgin, A.O. Kharchenko, O.V. Khromov. – K.: Kondor-Izdatel'stvo, 2014. – 251 s.
9. Dolgin V.P. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: Ucheb. posobiye (Reliability of technical systems) / V.P. Dolgin, A.O. Kharchenko. – M: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 167 s.

УДК 621.454

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ПРИ ЛЕНТОЧНОМ ШЛИФОВАНИИ ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

С.М. Братан¹, Т.В. Стадник¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г.Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье приводятся результаты исследований СОТС используемых для шлифования титана и титановых сплавов, даны рекомендации для выбора наиболее эффективных на сегодня составов СОТС для ленточного шлифования длинномерных изделий из титановых сплавов с учетом безвредности СОТС. На основании результатов исследований авторов, опыта промышленных предприятий, имеющихся отечественных и зарубежных публикаций, рассмотрены особенности взаимодействия СОТС с обрабатываемым материалом и абразивным инструментом, которые следует учитывать при разработке технологических процессов ленточного шлифования титановых сплавов, а также при проведении дальнейших исследований по оптимизации операций.

Ключевые слова: ленточное ротационное шлифование, СОТС, сила резания, абразивная лента, износ.

EVALUATION OF EFFECTIVENESS OF CUTTING FLUIDS FOR BELT GRINDING OF LONG-LENGTH PRODUCTS OF TITANIUM ALLOYS

S.M. Bratan¹, T.V. Stadnik¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of studies of the cutting fluids used for grinding titanium and titanium alloys, recommendations are given for the selection of the most effective compositions of cutting fluids for belt grinding of long-length products of their titanium alloys, taking into account the harmlessness of the cutting fluids. In the article, based on the results of the authors research, the experience of industrial enterprises and available domestic and foreign publications, the features of the interaction of cutting fluids with the processed material and abrasive tool are considered, which should be taken into account when developing technological processes for belt grinding of titanium alloys, as well as during further research to optimize operations.

Keywords: rotary belt grinding, cutting fluids, cutting force, abrasive belt, wear.

В современных отраслях машиностроения, таких как - авиастроение, ракетостроение, судостроение, приборостроение, а также химической и нефтехимической промышленности в качестве конструкционных материалов находят широкое применение титановые сплавы. Так, например, в авиастроении титановые сплавы используются для изготовления винтов двигателей, корпусов, крыльев, двигателей, обшивки, трубопроводов, крепежа и многого другого. В несущей конструкции современного гражданского самолета применяется 15 - 20% ти-

тановых деталей. Например, Ил-76 и Ил-76Т имеют 15% титановых деталей от общей массы конструкции, а при производстве Boeing нового типа 787 Dreamliner титановые прутки ВТ16 из России используются в 30% сборочных узлов посадочных устройств самолета. С увеличением в конструкциях самолетов доли композиционных материалов, требуется материал, который не корродирует при взаимодействии с ними. Такими являются титановые сплавы ВТ23, ВТ23М, которые идеально отвечают всем этим требованиям, обеспечивают авиалайнерам сни-

жение веса и стоимости конструкции на 20-30%, в сравнении с другими материалами, а также повышает их эксплуатационную надежность на 25-35% [1].

В ракетостроении из титановых сплавов BT23, BT23M, а также из $(\alpha+\beta)$ -сплава BT43 с высокой трещиностойкостью изготавливают монолитные, сварные и паяные баки для хранения топлива и сжатых газов. Наряду с этим, в космической индустрии особое применение нашел титановый сплав с никелем, особенность которого заключается в том, что конструкции из него способны «запоминать» свою форму. Из такого сплава делают радиоантенны и каркасы солнечных батарей, которые можно свернуть при обычной температуре, а при нагревании они самостоятельно восстанавливают первоначальные геометрические размеры [2].

В судостроении титановые сплавы BT23, BT23M, BT14, BT5Л, BT3-1Л используются благодаря способности металла не корродировать в морской воде, выдерживать высокие механические нагрузки. Из заготовок, таких как титановые плиты и прутки, изготавливают гребные винты, валы, обшивку корпусов и т.д. В свою очередь титановый лист идет на производство теплообменников, глушителей для двигателей подводных лодок, дисков различных измерительных приборов. Малый удельный вес титанового сплава делает корабли максимально маневренными, а стойкость материала к соленой воде дает возможность в разы сократить периодичность технического обслуживания подводных частей судна. Наряду с этим, титановые сплавы типа BT6 применяются для изготовления лопаток первых ступеней ротора и шатунов для морских газотурбинных двигателей корабельных энергоустановок [3].

Без титановых сплавов сегодня было бы невозможным эффективное производство хлора, калия, натрия, марганца, соды, мочевины, органического стекла, отбеливающих веществ, фармацевтических средств и еще десятков наименований. Из титанового сплава делают насосы, компрессоры, фильтры и трубопроводы для перекачки кислот. Чаще всего для деталей и узлов оборудова-

ния химического производства применяют титановые листы и проволоку из сплава марки BT1-0 с наилучшими антикоррозийными характеристиками при рабочей температуре до 350°C и сплава AT-3 с уникальными антифрикционными свойствами [4].

Титан применяют для изготовления оболочки реакторов на быстрых нейтронах, узлов ядерных реакторов, электродов. В медицинской промышленности из титановой проволоки делают инструменты, части искусственных органов, эндопротезы, зубные импланты, внутрикостные фиксаторы, стержни, гвозди, спицы, скобы, поскольку титан не отторгается человеческим организмом. Из титановых листов производят перерабатывающие аппараты для пищевой промышленности (автоклавов, центрифуг), варочные котлы для кислых и острых соусов, тару для пищевых продуктов и т.п. В автомобилестроении титановые сплавы используют для коленчатых валов, клапанов, втулок, деталей подвески и ходовой части техники специального назначения. В электронике - для корпусов портативных компьютеров, мобильных телефонов, акустических систем. Спектр отраслей, где применяется титан и титановые сплавы активно расширяется, что позволит в ближайшем будущем создавать перспективные и высокоэффективные конструкции нового поколения, способные работать при температурах от -196 до +600°C. [5].

Титан и титановые сплавы используют для производства ответственных деталей, к ним предъявляются высокие требования по точности и качеству поверхностного слоя [6].

На металлургических заводах и заводах-потребителях осуществляется обработка поверхности металла, в результате которой теряется значительное количество годного металла. Особенно велики потери на переделах производства титана и титановых сплавов, где только при зачистке потери годного металла составляют 20% и более [7].

В целом можно выделить основные дефекты, влияющие на качество готового проката: заусенцы и закаты, волосовины, неправильная форма катанки и неточные размеры

сечения (овал) [8]. Удаление дефектов поверхности является одним из самых трудоемких и низко производительных рабочих процессов в металлургии, на участках и в цехах зачистки занято до 35% численности персонала прокатного цеха. Дефектный слой с катанки удаляют химическим и механическим методами, причем последние имеют ряд технологических, экологических и экономических преимуществ. К основным дефектам поверхности заготовки и готового проката, которые устраняют абразивной зачисткой, относят поверхностные трещины, образующиеся при прокатке, газовые раковины и неметаллические включения, находящиеся на поверхности проката [9].

Для удаления дефектного поверхностного слоя с поверхности длинномерных изделий (проволока, прутковый и трубный прокат и т. д.) используется процесс ротационного ленточного охватывающего шлифования [10-13].

Шлифование деталей из титановых сплавов характеризуется интенсивным износом абразивных зерен и налипанием на них шлифуемого материала. Низкая теплопроводность (у титана меньшая в 5 раз по сравнению с конструкционными сталями), высокая химическая активность свежесрезанных поверхностей деталей и стружки при температурах, возникающих в малых объемах, повышенная прочность и способность к упрочнению в тонком деформированном слое усложняет процесс шлифования [14].

Низкая теплопроводность титановых сплавов требует использования высокоэффективных СОТС, способствующих получению качественной поверхности деталей и повышению производительности процесса. Без применения СОТС процесс шлифования из титана и его сплавов вообще невозможен [15].

Для осуществления качественной обработки титана абразивными лентами нужны СОТС гарантированно обеспечивающие снижение теплового режима, образование защитных пленок на обрабатываемых поверхностях деталей.

При абразивной обработке деталей из титановых сплавов СОТС должна обеспечи-

вать отсутствие засаливания ленты, хорошую транспортировку и удаление тонкодисперсной стружки и абразивных частиц из зоны резания. Кроме того, при финишной обработке ответственных деталей СОТС должна полностью смываться с готовых деталей [16].

Смазочные свойства СОТС оценивали по изменению тангенциальной силы резания при обработке образцов из сплавов ВТ5, ВТ3-1 и ВТ8М лентами из карбида кремния и специального абразивного зерна «Компакторн», известной немецкой фирмы VSM. Компактное зерно VSM представляет собой крупные режущие частицы, состоящие из большого числа мелких зерен, соединенных между собой связующим материалом (рис. 1).

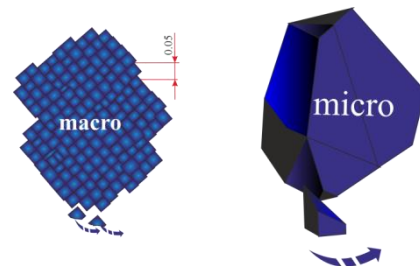


Рис.1. Схема износа шлифзерна «Компакторн»

Крупные зерна не разрушаются, как обычно на крупные частицы, а распадаются в процессе изнашивания на мелкие фрагменты путем отделения мелких зерен. При этом острота кромок и режущая способность зерен постоянно сохраняется, а срок службы инструментов из нового зерна многократно увеличивается.

Эксперименты проводили на специально созданной установке фотографии и схема которой изображены на рис. 2 и 3.

Основные характеристики экспериментальной установки ленточного ротационного шлифования: скорость ленты: 15-50 м/с; число оборотов планшайбы: 200 об/мин; продольное перемещение проволоки: 9,6-34,7 м/мин; ширина ленты: 50 мм; диаметр заготовки: 10-50 мм; мощность: 2 кВт. Устройство ленточного ротационного шлифования содержит привод движения абразивной ленты со скоростью резания, выполненный в виде шкивов, связанных ременны-

ми передачами; привод вращения планшайбы, обеспечивающий круговую подачу.

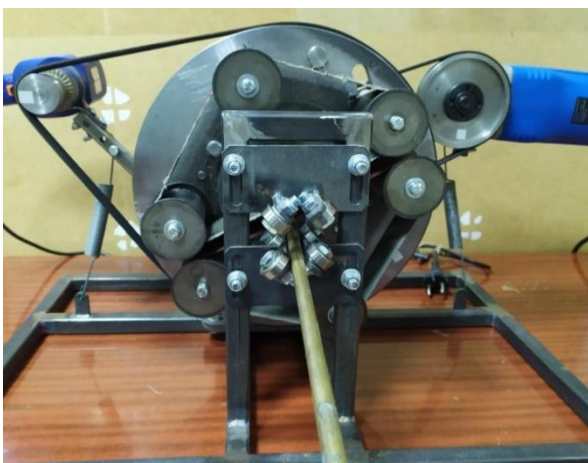


Рис.2. Внешний вид устройства для исследования процесса ленточного ротационного шлифования

Лентопротяжный механизм имеет две абразивные ленты 1, которые получают вращение от одного привода. Каждая из абразивных лент располагается на трех роликах – ведущем 2, натяжном 3 и ведомом 4. Натяжные ролики расположены диаметрально-противоположно друг к другу, расположение ведущих и ведомых роликов двух лент выполнено в зеркальном отображении.

Натяжение абразивной ленты обеспечивается натяжными роликами. Увеличение площади контакта ленты и заготовки и, соответственно, увеличение угла охвата осуществляется с помощью изменения положения роликов - натяжного и ведомого.

Устойчивость ленты на опорных поверхностях роликов лентопротяжного механизма реализуется путем изменения угла наклона оси ведомого ролика. Поперечная

подача осуществляется за счет изменения натяжения ленты.

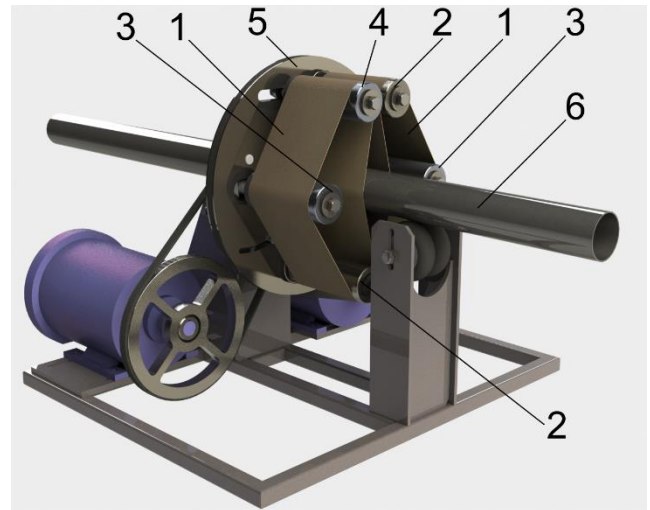


Рис. 3. Модель устройства ленточного ротационного шлифования: 1 – абразивные ленты; 2 – ведущие ролики; 3 – натяжные ролики; 4– ведомые ролики; 5 – планшайба; 6 – обрабатываемая деталь

Изменение натяжения ленты обеспечивается за счет одновременного перемещения натяжного ролика 3 (или ведущего 2 и ведомого 4 роликов).

Параметры режимов резания (скорость перемещения ленты) рассчитывали по частоте вращения ведущего ролика, которую контролировали с помощью бесконтактного лазерного тахометра модели DT-2234C (диапазон измерения: от 2,5 до 99 999 об/мин; шаг измерения: 0,1 об/мин для диапазона 2,5 ~ 999,9 об / мин; 1 об/мин при показаниях свыше 1000 об/мин; погрешность измерения: $\pm 0,05\%$).

Подачу контролировали при проведении экспериментальных исследований с помощью оптического измерителя VLM500 (точность – 0,025%; погрешность измерения по DIN 1319 –0,1%)

Устройство оснащено комплексом аппаратуры, регистрирующей силы резания и температуру в процессе шлифования до 600°C.

Для измерения сил резания применяли динамометрические центра (передний и задний), снабженные проволочными тензорезисторами (датчиками сопротивления) между которыми закреплена заготовка. Два динамометрических центра позволяют фиксиро-

вать силы резания в процессе шлифования при любом положении шлифовальной ленты относительно обрабатываемой детали. Проволочные датчики, наклеенные на вертикальных плоскостях переднего и заднего центров, соединены в один мост и используются для измерения силы P_y (рис. 4). Датчики, наклеенные на горизонтальных плоскостях обоих центров, используются для измерения силы P_z .

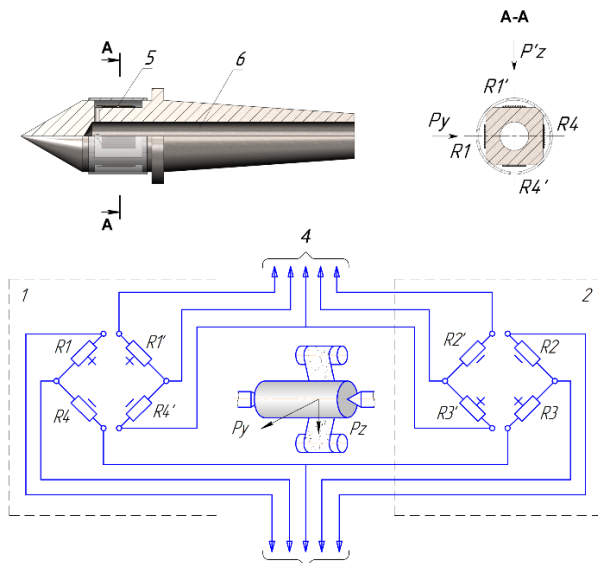


Рис. 4. Тензометрические центра а)- схема включения проволочных датчиков сопротивления для измерения сил P_y и P_z . (1 — передний центр; 2 — задний центр; 3 — провода к прибору для измерения силы P_y , 4 — провода к прибору для измерения силы P_z ; 5 — датчики; 6 — отверстие для вывода проводов)

Схема измерения включает динамометрические центра, усилитель, аналого-цифровой преобразователь ЛА-50USB, подключенный к персональному компьютеру по известной методике. Тарировка тензометрических центров осуществлялась статическим нагружением. Масштаб тарировки определялся аппроксимацией по методу наименьших квадратов. Тарировочный график имел линейный характер. Общая погрешность при использовании данной методики составляет 10%.

Продольное перемещение динамометрических центров, с закрепленной между ними заготовкой, в процессе измерения осуществляется по направляющим на станине посредством зубчатой рейки и шагового электродвигателя (рис. 5).

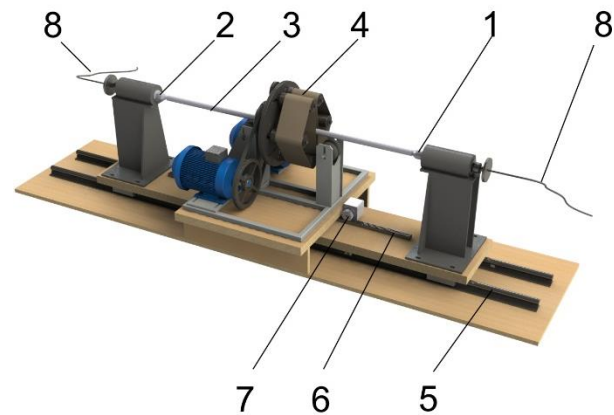


Рис.5. Схема установки для измерения сил резания: 1, 2 — передний и задний тензометрические центра соответственно; 3 — заготовка; 4 — установка для ротационного ленточного шлифования; 5 — направляющие станины; 6 — зубчатая рейка; 7 — шаговый электродвигатель; 8 — провода, ведущие к прибору для измерения сил резания

Экспериментальные исследования проводили на образцах (прутки круглого сечения, диаметром 10-50 мм, нормальной точности изготовления, длиной 1500 мм) из титана и титановых сплавов BT5, BT3-1 и BT8M. В качестве СОТС исследовались растворы растворов 0,05 молярной концентрации (0,05 м) группы неорганических солей: KF; NaF; KNO_2 ; $NaNO_2$; KNO_3 ; $NaNO_3$; KCl; NaCl.

Объем сошлифованного материала определяли с помощью индикаторов, измеряя через определенные промежутки времени толщину сошлифованного слоя в нескольких точках по периметру образца.

Расход абразива оценивали посредством измерения толщины ленты специальным индикаторным устройством, до и после шлифования. Время работы рассчитывали по частоте вращения ротационной головки, измеренной бесконтактным лазерным тахометром. Оценка эффективности СОТС производилось по минутному съему Q_m материала

(мм³/мин); удельной производительности $q = Q_M / Q_K$, (где Q_K – износ ленты);

удельному расходу $W_{уд}$ мощности (кВт на мм³/мин); тангенциальной силе P_z шлифования и шероховатости R_a поверхности.

СОТС в зону резания подавали свободно падающей струей через специальное сопло при минутном расходе $0,2...0,25 \times 10^{-3}$ м³/с.

Детали из титановых сплавов шлифовали с СОТС на основе водных растворов электролитов, следуя указаниям производителей СОТС, которые считают, что при деформировании в условиях высоких температур титан и его сплавы в отличие от сталей интенсивно окисляются и насыщаются кислородом. Активное взаимодействие с газами, особенно с кислородом, изменяет механические свойства поверхностного слоя титана: повышается его твердость и прочность, снижаются пластические свойства [14].

Анализ полученных результатов показывает, что в процессе шлифования деталей из титана лентами из карбида кремния съем металла при охлаждении водой в 2 раза выше, чем при обработке лентами из специального абразивного зерна «Компакткорн», немецкой фирмы VSM. Растворы солей по сравнению с водой увеличивают съем металла в несколько раз, при этом съем при шлифовании лентами немецкой фирмы больше на 10-30% чем при шлифовании титанового сплава BT5 лентами из карбида кремния (рис. 6).

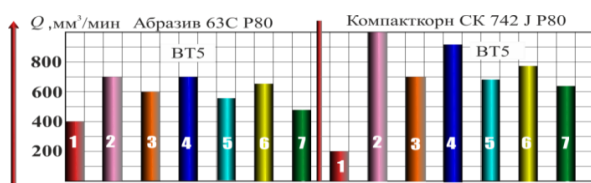


Рис. 6. Съем металла при шлифовании в 0,5 м растворах солей: 1– H₂O; 2– KF; 3 – NaF; 4–KNO₂; 5 – NaNO₂; 6 – KNO₃

Установлено, что применение растворов солей калия эффективнее соответствующих солей натрия. Таким образом можно сделать предположение, что независимо от применяемого абразивного материала индивидуальные свойства катионов калия и натрия влияют на съем металла. При шлифовании лентами немецкой фирмы VSM влияние анио-

нов прослеживается в меньшей степени, чем при шлифовании лентами из карбида кремния, но закономерность их эффективности сохраняется.

В результате оценки износа абразивных лент установлено, что при шлифовании деталей из титановых сплавов BT5 растворы солей понижают расход абразива или практически не влияют на его износ. На рис. 7, в качестве примера, приведена диаграмма износа лент при шлифовании сплава BT5 в различных СОТС.



Рис 7. Износ абразивной ленты при шлифовании в 0,5 м растворах солей: 1– H₂O; 2– KF; 3 – NaF; 4–KNO₂; 5 – NaNO₂; 6 – KNO₃; 7– NaNO₃

С целью исследования энергетических затрат на съем металла произвели оценку силы резания при шлифовании титановых сплавов с СОТС различного состава. В качестве энергетического критерия оценки влияния среды на обрабатываемость металлов выбрали удельную мощность шлифования (расход мощности на съем 1 мм³ металла):

$$W_{уд} = N_{\tau} / Q_M,$$

где N_{τ} – мощность шлифования, Вт; τ – время шлифования, мин; Q_M – величина съема обрабатываемого материала, мм³

Установлено, что при шлифовании деталей из титанового сплава в растворах солей P_z снижается (табл. 1), несмотря на увеличение съема металла, хотя должна возрастать. Следовательно, энергетические затраты на съем металла под действием растворов солей будут уменьшаться.

Применение растворов солей по сравнению с применением воды при шлифовании деталей из титанового сплава лентами “Компакткорн” СК 742 J P80 снижает удельную мощность в 2–3 раза, а при шлифовании лентами из карбида кремния – почти в 2 раза (рис. 8).

Таблица 1. Значение тангенциальной составляющей силы резания при шлифовании титановых сплавов

Соли и вода	Лента					
	“Компакткорн” СК 742 J P80			63C P80		
	Материал обрабатываемых деталей					
	BT5 P _z	BT3-1 P _z	BT8 P _z	BT5 P _z	BT3-1 P _z	BT8 P _z
KF	2,5	2,0	2,91	2,7	2,8	2,8
NaF	2,55	2,32	2,90	2,65	2,9	2,55
KNO ₂	2,55	2,10	2,8	2,6	3,0	2,65
NaNO ₂	2,6	2,20	2,6	2,65	2,9	2,6
KNO ₃	2,6	3,25	2,2	2,6	2,85	2,7
NaNO ₃	2,55	2,30	2,75	2,6	2,9	2,6
KCl	2,6	3,15	3,1	2,65	2,9	2,7
NaCl	2,6	2,05	3,1	2,9	2,95	2,6
H ₂ O	3,65	3,10	3,7	3,0	2,95	2,4



Рис. 8. Изменение удельной мощности при шлифовании в 0,5 м растворах солей: 1– H₂O; 2– KF; 3 – NaF; 4–KNO₂; 5 – NaNO₂; 6 – KNO₃; 7– NaNO₃

На рис. 9-10 приведен пример профилограмм, снятых с шлифованных образцов из титанового сплава BT3-1, имеющих одну и ту же исходную шероховатость.

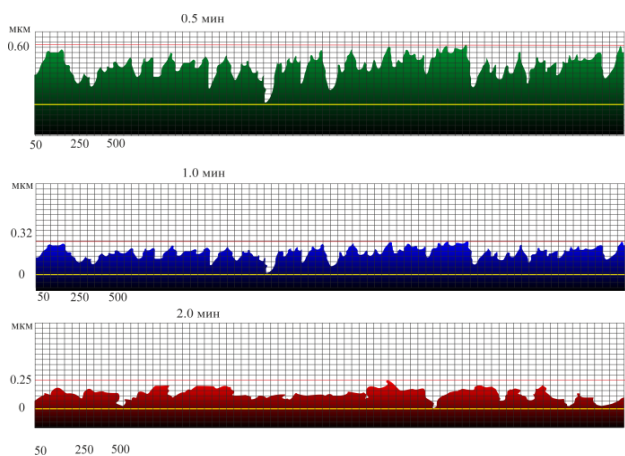


Рис. 9. Изменение поверхности деталей, из сплава BT3-1 в зависимости от времени шлифования с применением СОТС на основе KF, лентой 63С Р80

После шлифования деталей из сплава BT3-1 в воде и в растворах солей в пределах 0,63– 0,25 мкм установлено изменение значения арифметического отклонения профиля R_a за фиксированное время работы.

После шлифования деталей из сплава BT3-1 в воде и в растворах солей установлено изменение значения арифметического отклонения профиля R_a за фиксированное время работы в пределах 0,63 – 0,25 мкм.

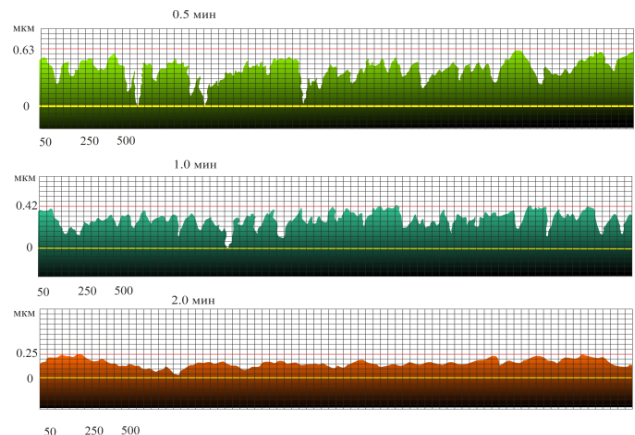


Рис. 10. Изменение поверхности деталей, из сплава BT3-1 в зависимости от времени шлифования с применением СОТС на основе KF, лентой “Компакторн” СК 742 J P80

Результаты испытаний показали, что растворам солей, более эффективным по съему металла, соответствуют лучшие показатели по шероховатости поверхности. При шлифовании в воде и растворах с низкой эффективностью ленты обеспечивают меньшую шероховатость и наоборот.

Список литературы

1. Климов В.Н. Современные авиационные конструкционные сплавы: учеб. пособие / В.Н. Климов, Д.М. Козлов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 40 с.
2. Халов М.О. Перспективы применения сплавов с памятью на основе никелида титана в устройствах аэрокосмического назначения / Электронный журнал «Труды МАИ». -2010. – № 55.– С. 17.
3. Горынин И. В. Титан в машиностроении / И.В. Горынин, Б.Б. Чечулин. – М: Машиностроение, 1990. – 400 с.
4. Томашов Н.Д. Титан и коррозионностойкие сплавы на его основе. – М.: Металлургия, 1985. – 81 с.
5. Бубнов В.А. Титан и его сплавы в машиностроении / В.А Бубнов, А.Н. Князев // Вестник Курган

- ского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 3 (42). – С. 92-96.
6. Егорова Ю.Б. Титановые сплавы для автомобилестроения / Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко, С.Б. Белова, Е.Н. Егоров // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 1137-1146.
 7. Александров В.К. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В.К. Александров, Н.Ф. Аношкин, Г.А. Бочвар и др. – М.: Metallurgiya, 1979. – 512 с.
 8. Расщупкин В.П. Дефекты металла: Учебное пособие по дисциплине «Материаловедение и ТКМ» для механических специальностей вузов / В.П. Расщупкин, М.С. Кorytov. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 37 с.
 9. Соболевская Т. Д. Влияние качества губчатого титана на наличие дефектов в полуфабрикатах и деталях из титановых сплавов / Т. Д. Соболевская, В. И. Гишкина, Т. А. Коваленко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудування. – 2009. – № 2. – С. 50-54.
 10. Шилиев С.А. Анализ конструктивных и технологических параметров устройства ротационного ленточного охватывающего шлифования на основе исследований динамики относительного движения абразивной ленты / С.А. Шилиев С.А., А.Г. Иванов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 6. – С. 12– 20.
 11. Bratan S. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating work-shop / S.Bratan, E. Vladetskaya, A. Kharchenko // MATEC Web of Conferences 129 (2017), Article Number 01083.
 12. 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 129 (2017), Article Number 01079.
 13. Братан С.М. Баланс перемещений в технологической системе при ленточном ротационном шлифовании / С.М. Братан, Т.В. Стадник, А.Г. Колесов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – Вып. 8, ч. 1. – С. 270-275.
 14. Паньков Л.А. Ленточное шлифование высокопрочных материалов. / Л.А. Паньков, Н.В. Костин. – М.: Машиностроение, 1978. – 126 с.
 15. Василенко О.А. Эффективность действия СОЖ при шлифовании / О.А. Василенко, А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – Вып. 8, ч. 1. – С. 215-220
 16. Хватов Б.Н. Исследование производительности шлифования абразивными лентами с самозатачивающимся зерном / Б.Н. Хватов, Д.В. Зубков, А.А. Родина // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, №4. – С. 1031-1037.

References

1. Klimov V.N. Sovremennye aviatsionnye konstruktivnye splavy: ucheb. posobie / V.N. Klimov, D.M. Kozlov. – Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2017. – 40 s.
2. Khalov M.O. Perspektivy primeneniia splavov s pamiat'iu na osnove nikelida titana v ustroistvakh aerokosmicheskogo naznachenii / Elektronnyi zhurnal «Trudy MAI». – 2010. – № 55. – S. 17.
3. Gorynin I. V. Titan v mashinostroenii / I.V. Gorynin, B.B. Chechulin. – M: Mashinostroenie, 1990. – 400 s.
4. Tomashov N.D. Titan i korrozionnostoikie splavy na ego osnove. – M.: Metallurgiya, 1985. – 81 s.
5. Bubnov V.A. Titan i ego splavy v mashino-stroenii / V.A Bubnov, A.N. Kniazev // Vestnik Kurgan-skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. – 2016. – № 3 (42). – S. 92-96.
6. Egorova Iu.B. Titanovye splavy dlia avtomobilestroeniia / Iu.B. Egorova, L.V. Davydenko, S.B. Belova, E.N. Egorov // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. – 2013. – № 3. – S. 1137-1146.
7. Aleksandrov V.K. Polufabrikaty iz titanovykh splavov/ V.K. Aleksandrov, N.F. Anoshkin, G.A. Bochvar i dr. – M.: Metallurgiya, 1979. – 512 s.
8. Rasshchupkin V.P. Defekty metalla: Uchebnoe posobie po distsipline «Materialovedenie i TKM» dlia mekhanicheskikh spetsial'nostei vuzov / V.P. Rasshchupkin, M.S. Korytov. – Omsk: Izd-vo SibADI, 2006. – 37 s.
9. Sobolevskaia T. D. Vliianie kachestva gubchato-go titana na nalichie defektov v polufabrikatakh i detaliakh iz titanovykh splavov / T. D. Sobolevskaia, V. I. Gishkina, T. A. Kovalenko // Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvannia. – 2009. – № 2. – S. 50-54.
10. Shiliaev S.A. Analiz konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov ustroistva rotatsionnogo lentochnogo okhvatyvaiushchego shlifovaniia na osnove issledovaniia dinamiki otnositel'nogo dvizheniia abrazivnoi lenty / S.A. Shiliaev S.A., A.G. Ivanov // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana. – 2011. – № 6. – S. 12– 20.
11. Bratan S. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating work-shop / S.Bratan, E. Vladetskaya, A. Kharchenko // MATEC Web of Conferences 129 (2017), Article Number 01083.
12. 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 129 (2017), Article Number 01079.
13. Bratan S.M. Balans peremeshchenii v tekhnologicheskoi sisteme pri lentochnom rotatsionnom shlifovanii / S.M. Bratan, T.V. Stadnik, A.G. Kolesov // Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.

-
- Tula: Izd-vo TulGU, 2017. – Vyp. 8., ch. 1. – S. 270-275.
14. Pan'kov L.A. Lentochnoe shlifovanie vysokoprochnykh materialov. / L.A. Pan'kov, N.V. Kostin. - M.: Mashinostroenie, 1978. – 126 s.
15. Vasilenko O.A. Effektivnost' deistviia SOZh pri shlifovanii / O.A. Vasilenko, A.V. Tiukhta, Iu.V. Vasilenko // Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki. – Tula: Izd-vo TulGU, 2016. – Vyp. 8, ch. 1.– S. 215-220
16. Khvatov B.N. Issledovanie proizvoditel'nosti shlifovaniia abrazivnymi lentami s samozatachivaiushchimsia zernom / B.N. Khvatov, D.V. Zubkov, A.A. Rodina// Vestn. Tamb. gos. tekhn. un-ta. – 2012. – T. 18, №4. – S. 1031-1037.
-

УДК 519.3:65.011.56:621.865.8

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЕОМЕТРИИ УПРУГОЙ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ РУКИ МАНИПУЛЯТОРА

А.И. Бохонский¹, Н.И. Варминская¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация² ФГКОУ ВПО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Используются кососимметричные оптимальные управления переносным поступательным и вращательным движениями упругих объектов, с достижением в конечном состоянии абсолютного либо относительного покоя. Для таких управлений предполагается известной частота первого тона собственных колебаний перемещаемого объекта. В этом случае, приемлемое минимально возможное время движения находится из числа общих корней системы трансцендентных уравнений, в которые превращаются моментные соотношения (равенства нулю относительного перемещения и скорости упругого объекта в проектируемый конечный момент времени). Рассмотрен метод стабилизации жесткости телескопической руки манипулятора при изменении ее длины, основанный на синхронном выдвигании элемента руки вдоль продольной оси. Это позволило (при согласовании с изменением общей длины руки) обеспечить постоянство частоты первого тона собственных колебаний (постоянство начальной жесткости).

Ключевые слова: упругая телескопическая рука манипулятора, стабилизация жесткости и частоты, оптимальное управление движением.

STABILIZATION OF THE EIGENTONE FREQUENCY WHEN THE GEOMETRY OF THE ELASTIC TELESCOPIC MANIPULATOR ARM IS CHANGING

A.I. Bokhonsky¹, N.I. Varminskaya¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation² Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Skew-symmetric optimal controls are used for the translational and rotational motions of elastic objects (with the achievement of absolute or relative quiescence at the final state). For such controls, it is assumed that the frequency of the natural oscillations first tone of the moved object is known. In this case, the acceptable minimum possible time of motion is found from the sequence of common roots of the transcendental equations system, into which the moment relations turn (equality to zero of the relative displacement and velocity of the elastic object at the projected final moment of time). A method of stabilizing the rigidity of the telescopic arm of a manipulator when its length is changing is considered. It is based on the synchronous elongation of the arm element along the longitudinal axis. This made it possible (in coordination with the change of the total length of the arm) to ensure the constancy of the frequencies of natural oscillations (constancy of the initial rigidity).

Keywords: elastic telescopic manipulator arm, stabilization of rigidity and frequency, optimal motion control.

Введение

В работах [1-5] исследованы кососимметричные оптимальные управления пере-

носным движением упругих объектов с конечным и бесконечным числом степеней свободы в предположении, что жесткость и,

следовательно, частоты колебаний постоянны.

В [6, 7] показано, что при выдвижении телескопической руки манипулятора с сосредоточенной массой (схват с грузом) жесткость руки и, естественно, собственные частоты не постоянны, что не позволяло применить обоснованные и исследованные в [8-15] законы переносного движения упругих объектов.

Стабилизация жесткости консольного нежесткого стержня в связи с изменением положения движущейся вдоль стержня массы может быть реализована путем непрерывного изменения осевого момента инерции поперечного сечения стержня за счет вращения отдельного элемента относительно продольной оси [7]. Отметим, что при проектировании манипуляторов минимальной массы для стабилизации жесткости (или спектра частот собственных колебаний) не исключается непрерывное управление пространственной конфигурацией манипулятора согласно реализуемой форме движения стержневой системы.

В монографии [6] предложено и исследовано одно из возможных технических решений стабилизации жесткости телескопической руки манипулятора при ее выдвижении. Стабилизация предполагает постоянство частоты первого тона собственных колебаний руки как консольного стержня переменной длины. Поворот вокруг продольной оси элементов конструкции при согласовании с выдвижением руки обеспечивает постоянство жесткости. Согласованное изменение осевого момента инерции поперечного сечения руки в зависимости от длины консоли обеспечивает стабилизацию жесткости и, следовательно, постоянство частоты первого тона колебаний. Вместе с тем, для реализации такого варианта необходим специальный привод вращения элементов руки.

Задача стабилизации частоты

Идея изменения конфигурации руки состоит в таком выдвижении звеньев в

направлении оси x , что в произвольный момент времени частота первого тона колебаний остается постоянной. Для исходного состояния руки без учета ее распределенной массы частота $k = \sqrt{c/m}$, где c – коэффициент жесткости; m – сосредоточенная масса. От силы $P = 1$ Н прогиб конца консоли равен $f = \frac{x_0^3}{3EJ_1}$, где

x_0 – длина руки; E – модуль упругости первого рода; J_1 – осевой момент инерции поперечного круглого сечения руки $\left(J_1 = \frac{\pi d_1^4}{64} \right)$.

Для вычисления прогиба руки в произвольный момент времени от $P = 1$ Н (рис. 1б) использован интеграл Мора

$$f_1 = \sum_{i=1}^2 \int_s \frac{\bar{M}_i \bar{M}_1 ds}{EJ_i}, \quad (1)$$

который вычислен по способу Верещагина:

$$f_1 = \frac{(x_0 + x_1 - x_2)^3}{3EJ_1} + \frac{(x_0 + x_1 - x_2)^2 x_2}{E(J_1 + J_2)} + \frac{x_2^3}{3E(J_1 + J_2)}. \quad (2)$$

Из равенства $f_1 = f$, с учетом $J_1 = J_2$, после преобразований следует нелинейное алгебраическое уравнение:

$$2(x_0 + x_1 - x_2)^3 + 3(x_0 + x_1 - x_2)^2 x_2 + x_2^3 - 2x_0^3 = 0. \quad (3)$$

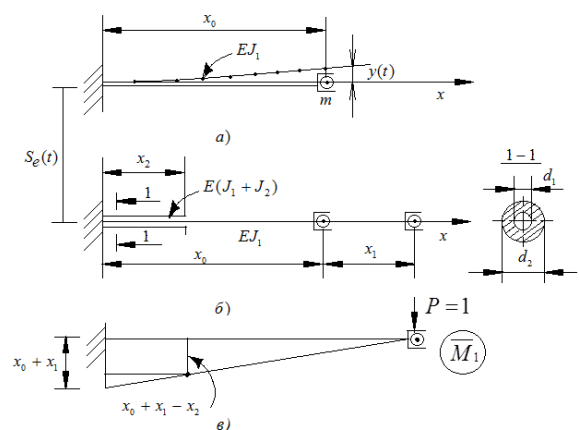


Рис. 1. Схемы движения руки: а) исходное состояние, б) переносное поступательное движение и выдвижение звеньев, в) эпюра изгибающего момента от единичной силы (в произвольный момент времени)

При заданном исходном значении длины консоли x_0 и законе движения $x_1(t)$, который по времени согласуется со временем переносного поступательного движения, из нелинейного функционального уравнения (3) находится закон движения $x_2(t)$ дополнительного элемента, стабилизирующего изгибную жесткость руки, т.е. обеспечивающего постоянство частоты собственных колебаний.

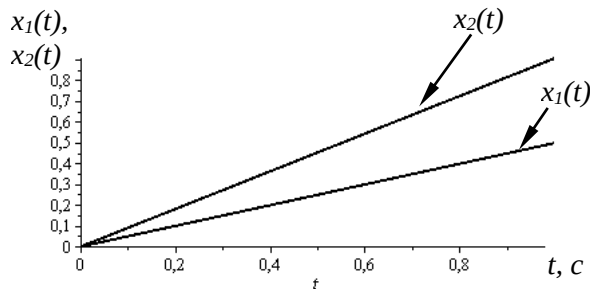


Рис. 2. Графики изменения длин звеньев руки манипулятора

Для переносного поступательного движения упругого объекта принято ускорение

$$U_e(t) = a \sin pt,$$

где $a, p = \text{const}$.

$$V_e(t) = \int U_e(t) dt + C_1, \quad S_e(t) = \int V_e(t) dt + C_2.$$

Произвольные постоянные C_1, C_2, a найдены с учетом краевых условий

$$S_e(0) = 0, \quad V_e(0) = 0,$$

$$S_e(T) = L, \quad V_e(T) = 0,$$

где L — максимальное перемещение.

$$\text{С учетом } p = 2\pi/T,$$

$a = 2\pi L/T^2$ получено:

$$\begin{aligned} V_e(t) &= \frac{L}{T}(1 - \cos pt), \\ S_e(t) &= L \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin pt \right). \end{aligned} \quad (4)$$

При заданных исходных данных ($T = 1$ с, $p = 2\pi$ с⁻¹, $L = 1$ м, $a = 2\pi$ м/с²) графики функций $U_e(t)$, $V_e(t)$ и $S_e(t)$ изображены на рис. 3.

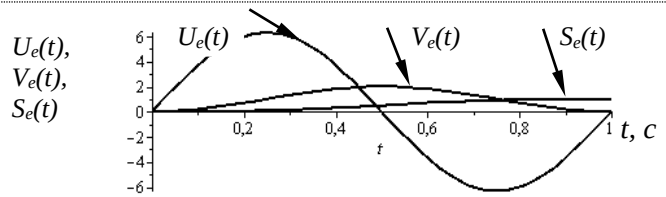


Рис. 3. Переносное ускорение, скорость и перемещение

Динамика относительного движения

Относительное движение упругого объекта описывается уравнением

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + k^2 y = -a \sin pt,$$

где k — частота собственных колебаний.

Решение уравнения при $y(0) = 0, \dot{y}(0) = 0$ следующее

$$y(t) = \frac{a}{k^2 - p^2} \left(\frac{p}{k} \sin kt - \sin pt \right),$$

$$\text{из которого } \dot{y}(t) = \frac{dy}{dt}, \quad \ddot{y}(t) = \frac{d\dot{y}}{dt}.$$

При $k = 4\pi$ с⁻¹ графики $y(t)$, $\dot{y}(t)$ изображены на рис. 4. Из графиков переносного и относительного движения следует, что при $t = T$ достигается абсолютный покой.

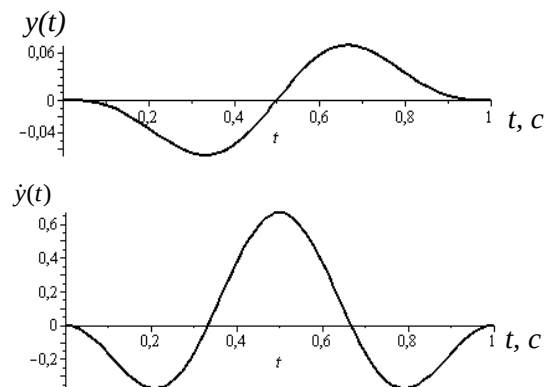


Рис. 4. Перемещение $y(t)$ и скорость $\dot{y}(t)$ в относительном движении

Параметры руки манипулятора

Определен диаметр поперечного сечения руки для исходного положения при заданной стабильной частоте собственных колебаний.

Квадрат частоты колебаний

$$k^2 = \frac{3EJ_z}{x_0^3 m}, \quad (5)$$

где модуль упругости материала $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; сосредоточенная масса $m = 20$ кг; исходная длина руки $= 1,2$ м; частота собственных колебаний $k = 4\pi$ с⁻¹; осевой момент инерции $J_z = \pi d_1^4 / 64$.

$$\text{Из (5) следует } d_1 = \sqrt[4]{\frac{64k^2 m x_0^3}{3\pi E}} = 0,02 \text{ см.}$$

Согласно условию равенства осевых моментов инерции поперечных сечений $J_2 = J_1$ следует, что $d_2^4 = 2d_1^4$ и $d_2 = 2,4$ см.

Выводы

Современные механические исполнительные органы манипуляторов представляют собой сложные пространственные стержневые конструкции с традиционно весьма жесткими элементами. При значительном снижении массы и жесткости конструкций крупногабаритных манипуляторов изменяется спектр частот собственных колебаний системы, который зависит от практической реализации формы движения для выполнения технологических операций.

Результаты исследований подтверждают возможность регулирования жесткости руки с целью стабилизации спектра частот собственных колебаний.

Список литературы

1. Солодовников В.В. Основы теории и элементы системы автоматического регулирования: учеб. пособие / В.В. Солодовников, В.Н. Плотноков, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
2. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – Киев-Донецк: Вища шк., 1982. – 116 с.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. Т.6 Защита от вибрации и ударов / под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
4. Фролов К.В. Прикладная теория виброзащитных систем / К.В. Фролов, Ф.А. Фурман. – М.: Машиностроение, 1980. – 276 с.
5. Генкин М.Д. Методы управляемой виброзащиты машин / М.Д. Генкин, В.Г. Елезов, В.В. Яблонский. – М.: Наука, 1985. – 240 с.
6. Бохонский А.И. Оптимальное управление движением деформируемых объектов: теория и механические приложения / А.И. Бохонский, Н.И.

Варминская, М.И. Мозолевский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.

7. Бохонский А.И. Стабилизация жесткости консольного элемента мехатронного модуля при перемещении тележки с грузом / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.А. Кабанов // Сетевое партнерство в науке, промышленности и образовании: тезисы докл. Международной конф. (Санкт-Петербург, 04-06 июля 2016 г.). – Санкт-Петербург, 2016. – С. 261 – 268.
8. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bohonsky, S.Y. Zobkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
9. Бохонский А.И. Управление движением системы с заданными частотами / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская // Механика, автоматика и робототехника: матер. Международной научно-практической конф. (Новокузнецк, 22 февраля 2018 г.). – Новокузнецк, 2018. – С. 7 – 13.
10. Bokhonsky A. Modelling and investigation of descents-continues vibrating mechatronic systems with damping: monographic / A. Buchacz, A. Bokhonsky, A. Wrobel. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.
11. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности: монография. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
12. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления: монография. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 84 с.
13. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов / А.И. Бохонский // Механика, автоматика и робототехника: матер. Международной научно-практической конф. (Новокузнецк, 22 февраля 2017 г.). – Новокузнецк, 2017. – С. 38 – 41.
14. Бохонский А.И. Поиск управлений колебаний упругих объектов в системе аналитических вычислений / А.И. Бохонский, А.В. Исаев // Оптимизация производственных процессов: сб. научн. тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – Вып. 10. – С. 48 – 51.
15. Бохонский А.И. Вариационные и реверсионные исчисления в механике: монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.

References

1. Solodovnikov V.V. Osnovy teorii i jelementy sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya: ucheb. posobie / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. Jakovlev. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 536 p.
2. Karnovskij I.A. Metody optimal'nogo upravleniya kolebanijami deformiruemym sistem / I.A. Karnovskij, Ju.M. Pochtman. – Kiev-Doneck: Vishha shk., 1982. – 116 p.
3. Vibracii v tehnikе: Spravochnik. V 6-ti t. T.6 Zashhita ot vibracii i udarov / pod red. K.V. Frolova. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 456 p.

4. Frolov K.V. Prikladnaja teorija vibrozashhitnyh sistem / K.V. Frolov, F.A. Furman. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 276 p.
5. Genkin M.D. Metody upravljajemoj vibrozashhity mashin / M.D. Genkin, V.G. Elezov, V.V. Jablonskij. – M.: Nauka, 1985. – 240 p.
6. Bokhonsky A.I. Optimal'noe upravlenie dvizheniem deformiruemyh ob#ektov: teorija i mehanicheskie prilozhenija / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, M.I. Mozolevsky. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2007. – 296 p.
7. Bokhonsky A.I. Stabilizacija zhestkosti konsol'nogo jelementa mehatronnogo modulja pri peremeshhenii telezhki s грузом / A.I. Bokhonsky, M.M. Maystrishin, A.A. Kabanov // Setevoe partnerstvo v nauke, promyshlennosti i obrazovanii: tezisy dokl. Mezhdunarodnoj konf. (Sankt-Peterburg, 04-06 ijulja 2016 g.). – Sankt-Peterburg, 2016. – P. 261 – 268.
8. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bohonsky, S.Y. Zobkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
9. Bokhonsky A.I. Upravlenie dvizheniem sistemy s zadannymi chastotami / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya // Mehanika, avtomatika i robototekhnika: mater. Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konf. (Novokuzneck, 22 fevralja 2018 g.). – Novokuzneck, 2018. – P. 7 – 13.
10. Bokhonsky A. Modelling and investigation of descents-continues vibrating mechatronic systems with damping: monographic / A. Buchacz, A. Bokhonsky, A. Wrobel. – Gliwice: Wydawichwo Politechniki, 2013. – 207 p.
11. Bokhonsky A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti: monografija. – M.: Vuzovskij uchebnyk: INFRA-M, 2016. – 174 p.
12. Bokhonsky A.I. Aktual'nye zadachi variacionnogo ischislenija: monografija. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 84 p.
13. Bokhonsky A.I. Jenergoemkost' upravlenija peremeshheniem ob#ektov / A.I. Bokhonsky // Mehanika, avtomatika i robototekhnika: mater. Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konf. (Novokuzneck, 22 fevralja 2017 g.). – Novokuzneck, 2017. – P. 38 – 41.
14. Bokhonsky A.I. Poisk upravlenij kolebanij uprugih ob#ektov v sisteme analiticheskikh vychislenij / A.I. Bokhonsky, A.V. Isaev // Optimizacija proizvodstvennyh processov: sb. nauchn. tr. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2007. – Vyp. 10. – P. 48 – 51.
15. Bokhonsky A.I. Variacionnye i reversionnye ischislenija v mehanike: monografija / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 212 p.

УДК 621.454

СОТС ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КЕРАМИКИ И СИТАЛЛОВ

С.М. Братан¹, С.И. Рошчупкин¹, А.С. Часовитина¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г.Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье приводятся результаты исследований СОТС, используемых для шлифования керамики и ситаллов, даны рекомендации для выбора наиболее эффективных на сегодня составов СОТС для круглого наружного и внутреннего шлифования изделий из износостойких неметаллических материалов, таких как минералокерамика и ситаллы. На основании результатов исследований авторов, опыта промышленных предприятий, имеющихся отечественных и зарубежных публикаций, рассмотрены особенности взаимодействия СОТС с обрабатываемыми материалами и абразивным инструментом, которые следует учитывать при разработке технологических операций круглого наружного и внутреннего шлифования.

Ключевые слова: шлифование, СОТС, сила резания, керамика, ситалл, смазывающая способность

THE CUTTING FLUIDS FOR GRINDING CERAMICS AND SITALL PARTS

S.M. Bratan¹, S.I. Roshchupkin¹, A.S. Chasovitina¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of research of the cutting fluids used for grinding ceramic and sitall, recommendations are given for the selection of the most effective compound of cutting fluids for external round and internal grinding products of wear-resistant non-metallic materials, such as mineral ceramics and sitall. Based on the results of the authors' research, the experience of industrial enterprises, domestic and foreign publications, the features of interaction of cutting fluids with processed materials and abrasive tools are considered, such results should be taken into account during developing technological operations for round external and internal grinding.

Keywords: grinding, cutting fluids, cutting force, ceramics, sitall, lubricity.

В машиностроении и приборостроении в качестве конструкционных материалов находят широкое применение износостойкие неметаллические материалы такие, как минералокерамика, ситаллы, материалы с определенными физическими свойствами, типа постоянных магнитов, являющихся, как правило, чрезвычайно хрупкими [1,2,3]. Работы по керамическим материалам во всем мире резко интенсифицируются, расширяются области применения этих материалов и рост капиталовложений в разработку материалов, технологию их производства и изготовления. Большинство развитых стран (Япония, США, Германия, Швеция, Россия и др.) осуществляют национальные программы по керамике. Лидирующее место на мировом рынке

керамики занимают Япония и США [4,5]. Фактическое производство керамики неуклонно возрастает. В ряде случаев требуется совместная обработка высокотвердых неметаллических материалов, армированных сталями и сплавами, например, шлифование корпусных деталей из алюмооксидной керамики, армированных молибденовыми и титановыми вставками, обтекатели летательных аппаратов из ситаллов и др [6].

В настоящее время производство неметаллов превысило по объему производство черных металлов. Эта тенденция связана со снижением себестоимости продукции, изготовленной из неметаллических материалов, при одновременном повышении ее срока

службы, надежности и экологической чистоты [7].

Перечисленные материалы используют для производства ответственных деталей, к ним предъявляются высокие требования по точности и качеству поверхностного слоя. Так, отклонения от цилиндричности и круглости несущих поверхностей подшипниковых узлов, точность взаиморасположения базовых и рабочих поверхностей опор задаются в пределах 0,005-0,0002 мкм, шероховатость поверхности $R_a = 0,16-0,04$ мкм, $R_z = 0,1-0,05$ мкм [8,9].

Перечисленные технические требования обеспечиваются абразивными методами обработки. Использование высокоэффективных СОТС способствует получению качественной поверхности деталей и повышению производительности. Без применения СОТС процесс шлифования и доводки труднообрабатываемых материалов вообще невозможен.

При алмазно-абразивной обработке деталей из керамики и ситаллов, спеченных твердых сплавов и других хрупких материалов СОТС должна обеспечивать отсутствие засаливания круга, хорошую транспортировку и удаление тонкодисперсной стружки и абразивных частиц из зоны резания. Кроме того, при финишной обработке ответственных деталей, СОТС обязана полностью смываться с готовых деталей [6].

В ряде случаев для усиления эффектов в СОТС добавляют поверхностно-активные вещества. Механизм разрушающего действия среды связан с проникновением тончайших пленок через микротрещины в деформируемый материал и разупрочнении его поверхностного слоя. Поверхностно-активные вещества стимулируют этот процесс, причем наибольшую интенсификацию процессов диспергирования керамических материалов вызовут поверхностно-активные вещества, близкие к нему по молекулярной природе [10].

Известно, что алмаз, окисляется на воздухе при температуре 700°C, отсюда вытекает ряд важных требований к СОТС, свя-

занных с обеспечением эффективного отвода тепла из зоны резания и обладания повышенной смазочной способностью. Последнее свойство достигается за счет образования на контактирующих поверхностях граничных пленок с малым сопротивлением на сдвиг, что снижает трение между связкой, алмазными зернами и обрабатываемой поверхностью, облегчая работу абразивных зерен [2].

Снижение сил происходит за счет диспергирования обрабатываемого материала в присутствии поверхностно-активных СОТС, это приводит к уменьшению тепловыделения в зоне контакта алмазных зерен с обрабатываемой деталью и уменьшения скорости их износа.

В проведенных исследованиях для повышения смазывающей способности воды и устранения ее коррозионного действия к СОТС добавляли щелочные компоненты. В ходе исследований было установлено, что их присутствие в составе электролитов резко снижает коэффициент поверхностного натяжения жидкости, что увеличивает проникающую способность воды, предотвращает коррозию металлических частей станка, позволяет осаждать шлам. Однако наряду с достоинствами электролиты обладают и недостатками; образуют нерастворимые осадки, растворяют покрытие (окраску) станка и воздействуют на связку круга. Часто на заводах в качестве СОТС из водных растворов электролитов применяют содовый раствор. Как показали результаты испытаний, СОТС с большим содержанием кальцинированной соды отрицательно влияет на расход алмаза и шероховатость обработанной поверхности.

Согласно рекомендациям ряда исследователей [1,11] эффективным заменителем соды может быть триэтаноламин, который является активной антикоррозионной добавкой. При высыхании раствор триэтанолamina оставляет масляную прозрачную пленку, как на обработанных деталях, так и на станке, но при малых концентрациях антикоррозионные свойства триэтанолamina

незначительны. Для усиления антикоррозионных свойств в СОТС с триэтаноламином необходимо добавлять нитрит натрия, который является хорошим пассивирующим средством и надежно предохраняет металлические части станка от коррозии. Вместо соды и триэтаноламина может быть применен тринатрийфосфат, который является антикоррозионной слабощелочной добавкой с моющей способностью намного выше, чем у соды. Для усиления антикоррозионных свойств в СОТС добавляют бензонат натрия, а для увеличения охлаждающих свойств вводится бура и смачиватель ОП-7 или ОП-10.

В проведенных исследованиях в качестве СОТС использовалось жидкости следующих составов СОТС 1 - сода кальцинированная 0,25%, тринатрийфосфат 0,25%, нитрит натрия 0,25%, бура 0,25%, индустриальное масло 10%, вода 80%; СОТС 2 - тринатрийфосфат 0,25%, нитрит натрия 0,25%, бура 0,25%, индустриальное масло 1,0%, вода 97,85%; СОТС 3 - сода кальцинированная 0,25%, тринатрийфосфат 0,25%, нитрит натрия 0,25%, бура 0,25%, вазелиновое масло 0,5%, вода 98,5%; СОТС 4 - триэтаноламин 0,7%, нитрит натрия 0,6%, бензонат натрия 0,4%, смачиватель ОП-7, ОП-10 0,1%, вода 98,3%; СОТС 5 - сода кальцинированная 0,95%, мыло 2,36%, спирт натрия 0,38%, бура 1,42%, индустриальное масло 10%, вода 84,38%.

СОТС №1 и №2 содержат в своем составе добавки индустриального масла и представляют собой масляные эмульсолы низкой степени концентрации, что, по данным ряда исследователей [11], должно способствовать повышению смазывающей способности сред. В СОТС №1 и №5 присутствует включение технической соды, которую в производственных условиях добавляют к составу водных сред для снижения возможной коррозии станка.

С целью выяснения влияния СОТС приведенных составов на температуру и силовые характеристики процесса шлифования была проведена серия экспериментов. Эксперименты проводились на кругло-шлифовальном станке RSM M 500

CNC алмазными кругами компании «Винтер-тур»: 1-типа 1A1, с наружным диаметром $D = 350$ мм, высотой $T = 20$ мм диаметром посадочного отверстия $H = 127$ мм, толщиной слоя $X = 4$ мм, из порошка синтетических алмазов марки 80D, размером зерна 181, с относительной концентрацией алмазов 100%, твердостью слоя R на бакелитовой связке BX50, с предельной рабочей скоростью 50 м/с; и 2-1A1, с наружным диаметром $D = 350$ мм, высотой $T = 20$ мм диаметром посадочного отверстия $H = 127$ мм, толщиной слоя $X = 4$ мм, из порошка синтетических алмазов марки 80D, размером зерна 181, с относительной концентрацией алмазов 100%, твердостью слоя R на металлической связке M, с предельной рабочей скоростью 50 м/с.

Обработке подвергались образцы из ситалла АС-418 и технической керамики ЦМ-332 диаметром 100 мм, длиной 300 мм.

Подготовку алмазного инструмента проводили в следующей последовательности. После установки на планшайбу круг балансировали и правили вращающимся абразивным кругом 150x36x20 64С 100 СТ1 3 К5 при глубине $t = 0,005$ мм и подаче вдоль образующей рабочей поверхности $S_x = 0,4$ мм/об.

Во время правки алмазный круг вращали с частотой 2 оборота в минуту. Окончательно рабочую поверхность инструмента формировали шлифованием абразивного валика на основе карбида кремния зеленого 63С 40 СМ1 на аналогичных режимах.

Жидкость в зону резания подавали свободно падающей струей при минутном расходе 7,5 литра.

Перед выполнением экспериментов оборудование прогревали, контролировали настройку измерительной аппаратуры и режимы резания.

В процессе экспериментальных исследований использовали тензометрические центра (рис.1) для регистрации сил, возникающих при шлифовании позволяющие измерять радиальную P_r и тангенциальную P_z составляющие силы резания в диапазоне (5 -

2000) Н с точностью $\pm 2,5$ Н. Регистрация температуры (до 1000°C) осуществлялась при помощи искусственной термопары хромель-капель (хромель-константан) (NiCr-NiCu) диаметром 0,2 мм. Термопары прокладывались в специальных пазах, вырезанных в образце, изолировались, после чего образец склеивался эпоксидной смолой, дабы в процессе шлифования СОТС не попадала на спай. Глубина залегания головки термопары - 2 мм.



Рис. 1. Тензометрические центра

Эксперименты проводились при использовании составов СОТС, приведенных ниже. Для каждого вида СОТС обработка производилась в одинаковых условиях кругами, обладающим определенной режущей способностью, по плану полуреплики 2^{3+1} , при варьировании режимов обработки в пределах: скорость круга $V = (23-50)$ м/с; подача $S = (1,1-4,47)$ м/мин; глубина резания $t = (0,1-0,2)$ мм.

Результаты экспериментов влияния СОТС на температуру при вариации режимов резания представлены на рис. 2.

При шлифовании ситалла и технической керамики при максимальных, наиболее напряженных режимах обработки ($t = 0,2$ мм, $S = 4,47$ м/мин, $V = 50$ м/с) в среде СОТС №1 температура достигала $Q = 300-360^{\circ}\text{C}$, при использовании СОТС №2 $Q = 70-75^{\circ}\text{C}$, при использовании СОТС №3 $Q = 110-128^{\circ}\text{C}$, СОТС №4 $Q = 77-82^{\circ}\text{C}$, СОТС №5 $Q = 230-246^{\circ}\text{C}$.

Анализ полученных результатов позволяет сделать заключение, что наличие масла в составе жидкостей в указанном в СОТС количестве, не влияет на их охлаждающую способность, тем не менее, приводит к практически трехкратному

снижению температуры в зоне обработки (СОТС №2 в сравнении с СОТС №1 и СОТС №5). По нашему мнению, причина этого явления связана со степенью поверхностной активности среды с уровнем ее проникающей способности в зону резания. СОТС №3 и СОТС №4 (наличие в составе ПАВ при отсутствии масла), обладая такой способностью, оказывает, при прочих равных условиях, максимальное воздействие на снижение температуры при шлифовании ситалла и керамики практически при всех рассмотренных сочетаниях режимов резания.

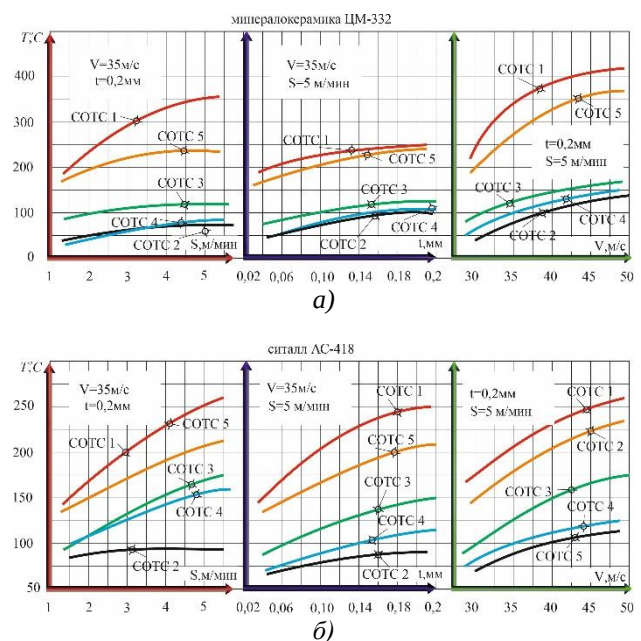


Рис. 2. Влияние составов применяемых СОТС на температуру в зоне контакта при вариации режимов резания:

- а) при обработке керамики ЦМ-322;
- б) при обработке ситалла АС-418

Анализ полученных данных (рис. 2) позволяет сделать вывод, что из всех параметров режима шлифования наибольшую степень влияния на температуру оказывает скорость резания (рис.2). В условиях глубинного шлифования, когда глубина шлифования t больше величины выступания зерен из связки, с увеличением скорости резания увеличивается количество нережущих зерен, такие зерна вместе со связкой скользят по обрабатываемой поверхности, при этом увеличивается температура в зоне контакта,

тепло не успевает уноситься СОТС, а переходит в деталь. Наличие масляных включений в составе среды усугубляет это явление. В результате чего снижается режущая способность кругов.

На (рис. 3) представлены данные эксперимента по определению составляющих силы резания P_y и P_z при шлифовании керамики ЦМ-322 и ситалла АС-418 в условиях использования сред различной степени активности при вариации режимов обработки.

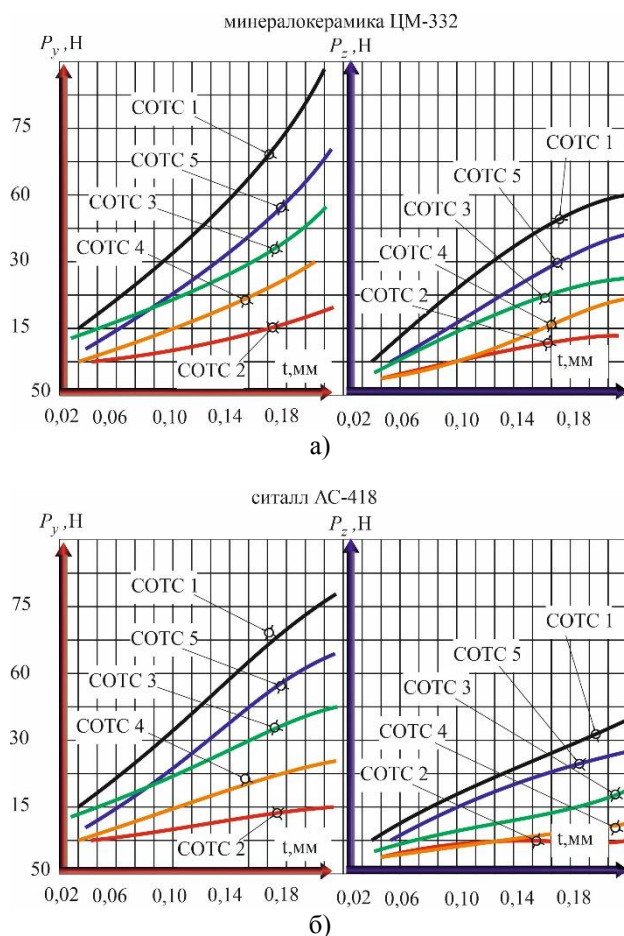


Рис. 3. Влияние составов применяемых СОТС на температуру в зоне контакта при вариации режимов резания: а) при обработке керамики ЦМ-322; б) при обработке ситалла АС-418

Максимальное влияние на уровень P_y и P_z оказывает и глубина резания вне зависимости от состава применяемой СОТС. Сила P_y возрастает с увеличением глубины резания t . Увеличение скорости резания и подачи s практически не сказывается на уровне P_y и P_z при шлифовании керамики ЦМ-322, ситалла АС-418 с использованием

сред, имеющих в своем составе одинаковое количество ПАВ и минимум масла – СОТС №2 или вообще не содержащих масла – СОТС №3 и СОТС №4. При использовании среды, имеющей в своем составе дополнительно к ПАВ большее количество масла (до 10%) – СОТС №1 СОТС №5, увеличение скорости резания оказывает отрицательное влияние на изменение составляющих силы резания, как для кругов на металлической связке так и для кругов на бакелитовой связке. Шероховатость обработанной поверхности при шлифовании кругами на органической связке с применением маслянистых жидкостей намного выше, чем при применении водных растворов. Это объясняется тем, что бакелитовая связка интенсивно впитывает масло.

Водные растворы СОТС обладают лучшим охлаждающим действием благодаря большей теплоемкости, теплопроводности, скрытой теплоте и скорости испарения по сравнению с маслами. Поэтому для алмазного шлифования они наиболее пригодны. Масляные жидкости обладают ничтожным охлаждающим действием, поэтому их применение при обработке рассматриваемой группы материалов, особенно кругами на металлической связке, нежелательно.

Применение СОТС при шлифовании керамики и ситаллов позволяет снизить коэффициент трения связки круга и алмазных (абразивных) зерен с поверхностью обрабатываемого материала за счет смазывающего действия жидкости; снизить температуру в зоне контакта круга с деталью за счет охлаждающего действия жидкости; уменьшить закаливаемость круга за счет смазывающего действия жидкости; уменьшить износ алмазного (абразивного) круга за счет охлаждающего и смазывающего действия жидкости, что позволяет повысить точность обработки настроенной партии деталей; уменьшить величину гребешков неровностей на обработанной поверхности и число дефектов (микротрещин, сколов и др.) за счет

смазывающего, смывающего и охлаждающего действия жидкости.

В табл. 1 приведены рекомендации по применению СОТС для шлифования керамических материалов и ситаллов.

Таблица 1. Рекомендуемые составы СОТС при шлифовании алмазными кругами деталей из керамики и ситаллов

СОТС			Шлифование				
			Предварительное	чистовое	окончательное		
			кругами на связке				
Компоненты		Содержание, %	металлической	органической	металлической	органической	
1	2	3	4	5	6	7	8
СОТС 1	Сода кальцинированная	0,25			+	+	
	Трина-трийфос-фат	0,25					
	Нитрит натрия	0,25					
	Бура	0,25					
	Инду-стриаль-ное масло	10,0					
	Вода	80,0					
СОТС 2	Инду-стриаль-ное масло	1,0	СОТС 3-(сода, кальцинирован-ная 0,25%, 0,25%, нитрит натрия 0,25%, бура 0,25% , 0,5%, вода 98,5%);		+	+	
	Трина-трийфос-фат	0,25					
	Нитрит натрия	0,25					
	Бура	0,25					
	Вода	97,85					

СОТС 3	Сода кальцинированная	0,25	+	+	+	+	
	Тринатрийфосфат	0,25					
	Вазелиновое масло	0,5					
	Нитрит натрия	0,25					
	Бура	0,25					
	Вода	98,5					
СОТС 4	Триэтиленгликоль	0,7			+	+	+
	Нитрит натрия	0,6					
	Бензонат натрия	0,3					
	Смачиватель ОП-7, ОП-10	0,1					
	Вода	98,3					
СОТС 5	Сода кальцинированная	0,95			+	+	+
	Бура	1,42					
	Мыло	2,36					
	Спирт	0,38					
	Индустриальное масло	10,00					
	Вода	84,38					

На разных стадиях обработки «полезными» могут быть различные составляющие СОТС, их определяется условиями обработки керамических материалов и ситаллов.

Наличие масла в СОТС ухудшает температурный режим в зоне контакта шлифовального круга и заготовки, что способствует повышению температуры на поверхности заготовки, это оказывает негативное влияние на качество обработанной поверхности. Применение масляных СОТС при обработке рассматриваемой группы материалов, особенно кругами на металлической связке, нежелательно.

Для обеспечения высокой производительности на операциях чернового шлифования целесообразно использовать СОТС, обладающие повышенной диспергирующей способностью, позволяющие интенсифицировать сьем материала активной средой при минимальном силовом воздействии.

На чистовых операциях для обработки хрупких неметаллических материалов

можно рекомендовать к использованию СОТС с поверхностно-активными веществами и минимальными добавками масел, обеспечивающих снижение радиальной составляющей силы резания, за счет уменьшения трения связки по поверхности детали.

На основании полученных результатов, лучшими СОТС при шлифовании хрупких неметаллических материалов следует считать: 1) для черновой обработки следует считать СОТС 3 - сода кальцинированная 0,25%, тринатрийфосфат 0,25%, нитрит натрия 0,25%, бура 0,25%, вазелиновое масло 0,5%, вода 98,5%; 2) для чистового шлифования СОТС 2 - тринатрийфосфат 0,25%, нитрит натрия 0,25%, бура 0,25%, промышленное масло 1,0%, вода 97,85%; 3) для тонкого шлифования СОТС 4 - триэтанолламин 0,7%, нитрит натрия 0,6%, бензонат натрия 0,4%, смачиватель ОП-7, ОП-10 0.1%, вода 98,3%.

Список литературы

1. Калафатова Л.П. Технологические среды как способ интенсификации процессов механической обработки стекломатериалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. трудов. - Донецк: ДонГ-ТУ. - 1996. - Вып. 3. - С. 25-37.
2. Гусев В.В. Исследование формирования волнистости поверхности при алмазном шлифовании тонкостенных сложнопрофильных оболочек вращения из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник // Контенант. Научно-технический журнал. - Красногорск: Общественная академия «Контенант», 2013. - Том 12, № 2. - С. 29-35.
3. Носенко, В.А. Повышение эффективности плоского шлифования нежестких заготовок путём управления упругими деформациями / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, А. В. Саразов // Вестник Рыбинского гос. авиационного технологического университета им. П.А. Соловьёва. - 2017. - № 2 (41). - С. 342-348.
4. Гусев В.В. Исследование динамических характеристик элементов системы СПИД при шлифовании деталей сложной пространственной формы из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, И.С. Каракуц // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць. — Краматорськ, 2007. — Вип. № 21. — С. 148–155.

5. Якушев Н.З. Коническая оболочка под действием подвижных нагрузок / Н.З. Якушев, Р.С. Якушев // Исследования по теории пластин и оболочек. — Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1975. — С. 303–316.
6. Аверченков В.И. Технологическая наследственность при формировании качества изготавливаемых деталей/ В.И. Аверченков, А.С. Васильев, М.Л. Хейфец // Наукоемкие технологии в машиностроении: М.: Машиностроение, 2018. № 10 (88). С. 27-32
7. Гусев В.В. Обоснование расчетной схемы для исследования динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситалла / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник // Сучасні технології в машинобудуванні. — Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2011. — С. 14–23.
8. Bratan S. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating work-shop / S.Bratan, E. Vladetskaya, A. Kharchenko // MATEC Web of Conferences 129 (2017), Article Number 01083.
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 129 (2017), Article Number 01079.
10. Гусев В.В. Исследование динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник // Вестник СевНТУ. — Севастополь, 2012. — Вып. 128. — С. 60-67.
11. Худобин Л. В., Бердичевский Е. Г. Техника применения охлаждающих средств в металлообработке. М.: Машиностроение, 1977. 189 с.

References

1. Kalafatova L.P. Tehnologicheskie sredy kak sposob intensifikacii processov mehanicheskoy obrabotki steklomaterialov // Progressivnye teh-nologii i sistemy mashinostroenija: Mezhdunar. sb. nauchn. trudov. - Doneck: DonG- TU. - 1996. - Vyp. 3. - S. 25-37.
2. Gusev V.V. Issledovanie formirovaniya volnistosti poverhnosti pri almaznom shlifovanii tonkostennyh slozhnoprofil'nyh obolochek vrashhe-nija iz sitallov / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova, S.Ju. Olejnik // Kontenant. Nauchno- tehnikeskij zhurnal. - Krasnogorsk: Obshhestvennaja akademija «Kontenant», 2013. - Tom 12, № 2. - S. 29-35.
3. Nosenko, V.A. Povyshenie jeffektivnosti ploskogo shlifovanija nezhestkih zagotovok putjom upravlenija uprugimi deformacijami / V. A. Nosenko, V. N. Tyshkevich, A. V. Sarazov // Vestnik Rybin-skogo gos. aviacionnogo tehnologicheskogo univer-siteta im. P.A. Solov'jova. - 2017. - № 2 (41). - S. 342-348.

4. Gusev V.V. Issledovanie dinamicheskikh harakteristik jelementov sistemy SPID pri shlifovanii detalej slozhnoj prostranstvennoj formy iz sitallov / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova, I.S. Karakuc // Nadijnist' instrumentu ta op-timizacija tehnologichnih sistem: zbirnik naukovih prac'.— Kramatorsk, 2007. — Vip. № 21. — S. 148–155.
5. Jakushev N.Z. Konicheskaja obolochka pod dejstviem podvizhnyh nagruzok / N.Z. Jakushev, R.S. Jakushev // Issledovanija po teorii plastin i obolochek. — Kazan': Izd-vo Kazanskogo un-ta, 1975. — S. 303–316.
6. Averchenkov V.I. Tehnologicheskaja nasledstvennost' pri formirovanii kachestva izgotavlivaemyh detalej/ V.I. Averchenkov, A.S. Vasil'ev, M.L. Hejfec // Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii: M.: Mashinostroenie, 2018. № 10 (88). S. 27-32
7. Gusev V.V. Obosnovanie raschetnoj shemy dlja issledovanija dinamicheskogo sostojanija tehnologicheskoy sistemy almazno-abrazivnoj obra-botki tonkostennyh obolochek iz sitalla / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova, S.Ju. Olejnik // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni. — Har'kov: Izd- vo NTU "HPI", 2011. — S. 14–23.
8. Bratan S. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating work-shop / S.Bratan, E. Vladetskaya, A. Kharchenko // MATEC Web of Conferences 129 (2017), Article Number 01083.
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 129 (2017), Article Num-ber 01079.
10. Gusev V.V. Issledovanie dinamicheskogo so-stojanija tehnologicheskoy sistemy almazno-abrazivnoj obrabotki tonkostennyh obolochek iz sitallov / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova, S.Ju. Olej-nik // Vestnik SevNTU. – Sevastopol', 2012. – Vyp. 128. - s. 60-67.
11. Hudobin L. V., Berdichevskij E. G. Tehnika prime-nenija ohlazhdajushhih sredstv v metalloobra-botke. M.: Mashinostroenie, 1977. 189 s.

УДК 004.94

АНАЛИЗ CAD/CAM/CAE СИСТЕМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ПРЕСС-ФОРМ

А.Ю. Тараховский¹, А.В. Даньков²¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г.Севастополь, Российская Федерация² ООО «Стрим механик», г.Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы автоматизации компьютерной подготовки производства. Отмечается, что Несмотря на то, что в настоящее время существует множество CAD/CAM/CAE систем, обладающих огромным спектром возможностей, но лишь немногие из них обладают функциями по проектированию вспомогательного инструмента. На основе анализа существующих CAD/CAM/CAE систем рассмотрены детально возможности следующих САПР: SolidWorks (США), ASCON (Россия) и Autodesk (США). Анализ каждой из вышеуказанных систем проводился с целью выявления достоинств и недостатков каждой из них, а также определения направления работы по оптимизации и усовершенствованию существующего программного обеспечения. Особое внимание уделяется вспомогательными средствами для проектирования и расчета пресс-форм. В ходе сравнительного анализа были рассмотрены существующие программные решения, предназначенные для компьютерной подготовки производства пресс-форм для литья пластмасс под давлением. В настоящее время существуют три продукта от разных разработчиков CAD/CAM/CAE систем, для каждого из которых определены основные достоинства и недостатки. Наиболее удобным и универсальным инструментом для проектирования является «Пресс-формы 3D» фирмы ASCON. Данное приложение внедрено в отечественную CAD/CAM систему «Компас-3D» и весьма неплохо справляется со своими задачами, однако нуждается в усовершенствовании. Был определен основной недостаток – отсутствие каталогов стандартных деталей пресс-форм некоторых современных производителей.

Ключевые слова: САПР, CAD/CAM/CAE–системы, SolidWorks Plastics, Модуль MoldWorks, «Пресс-формы 3D», «Компас 3D», MoldDesign, Autodesk Inventor Professional, компьютерное моделирование, проектирование вспомогательный инструмент, проектирование и расчет пресс-форм, литье пластмасс под давлением.

ANALYSIS OF CAD / CAM / CAE SYSTEMS FROM THE POINT OF VIEW OF DESIGN AND CALCULATION OF PRESS FORMS

A.Yu. Tarakhovskiy¹, A.V. Dankov²¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation² Stream mechanic LLC, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article deals with the issues of automation of computer pre-production. It is noted that Despite the fact that there are currently many CAD/CAM/CAE systems that have a huge range of capabilities, but only a few of them have functions for designing auxiliary tools. Based on the analysis of existing CAD/CAM/CAE systems, the capabilities of the following CAD systems are considered in detail: SolidWorks (USA), ASCON (Russia) and Autodesk (USA). The analysis of each of the above-mentioned systems was carried out in order to identify the advantages and disadvantages of each of them, as well as to determine the direction of work on optimizing and improving existing software. Special attention is paid to auxiliary tools for designing and calculating molds. In the course of the comparative analysis, existing software solutions designed for computer preparation of production of plastic injection molds were considered. Currently, there are three products from different developers of CAD/CAM/CAE systems, for each of which the main advantages and disadvantages are defined. The most convenient and versatile design tool is the "3D Mold" by ASCON. This application is implemented in the domestic CAD / CAM system "Compass-3D" and copes with its tasks very well, but needs to be improved. The main drawback was identified – the lack of catalogues of standard mold parts from some modern manufacturers.

Keywords: CAD/CAM/CAE systems, SolidWorks Plastics, MoldWorks Module, "3D Molds", "Compass 3D", MoldDesign, Autodesk Inventor Professional, computer modeling, design auxiliary tool, mold design and calculation, plastic injection molding.

В условиях непрерывного развития компьютерных технологий, а также нарастающей глобализации рынка способность современного машиностроительного производства конкурировать в области производства изделий определяется прежде всего возможностями технологической подготовки производства (ТПП). В связи с этим, все производственные предприятия стремятся к увеличению возможностей ТПП, повышая качество выпускаемой продукции, а также снижая сроки изготовления и затраты на изготовление. С улучшением вышеперечисленных показателей и связан значительный прогресс современного машиностроительного производства [1-4].

Развитие такого производства с расширением номенклатуры выпускаемых изделий предусматривает неизменный рост потребностей в подборе и проектировании технологической оснастки. Следовательно, при изготовлении любого рода изделий в машиностроении, задача сокращения сроков, повышения качества и уменьшения трудоемкости проектирования оснастки является особенно важной. Успешное решение этой задачи может быть достигнута на предприятии только при внедрении информационных технологий, связанных с твердотельным моделированием и использованием компьютерных баз данных [5]. Собственно, по этой причине многие машиностроительные предприятия занимаются активным внедрением и использованием CAD/CAM/CAE систем [2].

CAD/CAM/CAE системы в машиностроении используются для проведения как конструкторско-технологических работ, так и работ по технологической подготовке производства. С помощью систем автоматизированного проектирования выполняется проектирование трёхмерных моделей деталей и сборочных узлов, разработка чертежей деталей, спецификаций, проектируется вспомогательная оснастка, а также составляются программы для обработки деталей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Объединение САПР с автоматизированной системой управления способствует созданию единого автоматизированного ком-

плекса, внедрение которого позволяет уменьшить цикл создания готовой продукции в 2 – 2,5 раза, сократить затраты на производство на 20-25%, а также существенно повысить качество изделия и его характеристики, а соответственно, и конкурентоспособность предприятия.

Несмотря на то, что в настоящее время существует множество CAD/CAM/CAE систем, обладающих огромным спектром возможностей, следует отметить, что могут быть определены и направления по оптимизации. Так, при обзоре и анализе существующих CAD/CAM/CAE систем можно выявить, что лишь немногие из них обладают функциями по проектированию вспомогательного инструмента. В настоящее время разработчики систем активно стремятся к расширению возможностей своего программного обеспечения, что достигается не только за счет разработки обновлений, но и за счет создания инструментов, с помощью которых пользователи программ смогут создавать свои собственные модификации программ.

В настоящее время существует ряд САПР, оснащенных вспомогательными средствами для проектирования и расчета пресс-форм [6].

Автоматизацией компьютерной подготовки производства в этом направлении занимались такие крупные разработчики САПР, как SolidWorks (США), ASCON (Россия) и Autodesk (США).

Рассмотрим детально возможности каждой из вышеуказанных систем с целью выявления достоинств и недостатков каждой из них, а также определения направления работы по оптимизацию и усовершенствованию существующего программного обеспечения.

Анализ возможностей SolidWorks Plastics

SolidWorks Plastics является частью программного продукта SolidWorks (США и предназначен для моделирования процесса литья деталей из пластмасс, а также их оптимизации [8]. Концепция проектирования

таких изделий представляется состоящей из 8 основных блоков [9]:

- Создание конструкторских моделей
- Предварительное моделирование заполнения пресс-форм
- Построение формообразующих
- Проектирование литниковой системы
- Выбор блока и размещение формообразующих
- Проектирование и анализ системы охлаждения
- Окончательное моделирование заполнения пресс-форм
- Оценка состояния изделия после производства.

После завершения создания детали возможно на основании одной конструкторской модели (без учета окружения: формообразующих, плит и т.д.) осуществить предварительный анализ проливаемости средствами модуля SolidWorks Plastics. На данном этапе решаются две задачи: оптимизация детали для производства (проверка возможности заполнения пресс-формы, определение местонахождения линий спая, определение требуемого давления впрыска и т.д.) и формирование требований для проектирования формообразующих (определение местонахождения выпоров, определение оптимального положения и количества мест впрыска и т.д.) [9].

После успешного окончания анализа проливаемости деталь передается конструктору оснастки для создания формообразующих. В среде SolidWorks для этого имеется набор инструментов, позволяющий создать литейные формы, отсекающие поверхности и поверхности разъема, определить знаки и толкатели. При создании формообразующих конструктор может учесть усадку материала.

При предварительном проектировании литниковой системы нет необходимости выполнять ее твердотельное моделирование, модуль SolidWorks Plastics позволяет разместить по модели систему каналов требуемой компоновки (односторонней, двусторонней, звездообразной) с впускными литниковыми каналами требуемого типа (точечный, щелевой, туннельный) и поперечного сечения (окружность, прямоугольник, эллипс, полу-

круг, трапециод). Данная система литников также может учитывать различные типы симметрии (2, 4, круговая), реализовать многогнездное размещение с автоматизированной балансировкой литниковой системы по результатам анализа проливаемости, использовать подогреваемые литниковые каналы. Литниковые каналы выделяются в отдельную область, что позволяет строить по ним отличную от детали сетку КЭ, а также отделять результаты расчета по ним от результатов по остальной модели (например, при расчете коробления) [9].

Дальнейшая задача – это выбор блока пресс-формы и размещение формообразующих. Модуль MoldWorks автоматизирует такие процедуры, как генерацию плит, сборку стандартных направляющих, позиционирующих, фиксирующих и прочих компонентов, присутствующих в каждой пресс-форме. Пример создания пресс-формы изображен на (рис. 1).

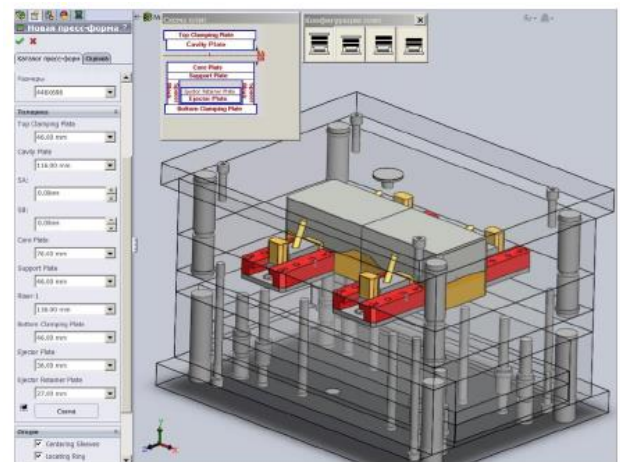


Рис. 1. Процесс создания пресс-формы в MoldWorks

Функционал MoldWorks можно разделить на несколько частей. Первая - генерация пресс-формы на основе стандартов, где MoldWorks реализует следующие возможности [9]:

- определение габаритов пакета плит;
- использование библиотек стандартных механизмов для смещения знаков;
- контроль допустимых размеров стандартных компонентов, предупреждение о критичной толщине пакета плит пресс-формы;

- автоматическое дооснащение пакета пресс-формы литниковыми кольцами и втулками, стопорными шайбами, направляющими штифтами и втулками для плит-толкателей;

- контроль допустимых габаритных размеров пакета по критерию входимости в рабочий просвет между направляющими колонками термопластавтомата.

Вторая часть – доработка пресс-форм и добавление крепежа и толкателей, а третья – создание системы охлаждения [9].

По завершению предыдущих этапов, в наличии имеются все необходимые данные для постановки задачи конечно-элементного анализа процесса производства, созданной конструктором детали [10 - 12]. Как и предварительный анализ проливаемости, данный расчет производится в модуле SolidWorks Plastics. Спроектированная оснастка, формообразующие, литниковая система, каналы охлаждения зачитываются и корректно разбираются модулем. Каждой группе объектов назначаются соответствующие характеристики, для того чтобы получить максимально объективную картину течения полимера и его последующего поведения в цикле производства [9]. Результаты конечного анализа изображены на рис. 2.

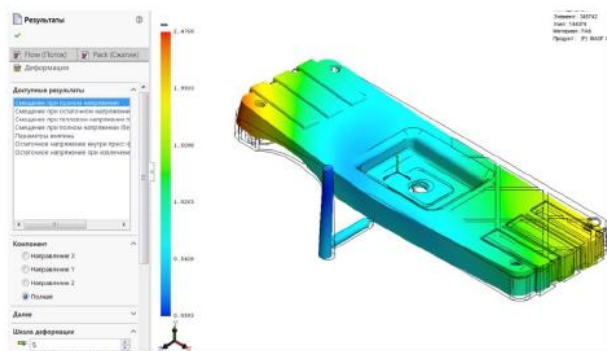


Рис. 2. Результаты конечно-элементного анализа

Преимущества SolidWorks Plastics:

- программное решение, эффективно справляющееся с автоматизированным проектированием пресс-форм;
- возможность проведения предварительного анализа проливаемости и окончательного анализа процесса производства созданной конструктором детали;

- большой объем стандартных элементов пресс-форм: DME, EOC, FUTABA, HASCO, PEDROTTI, MEUSBURGER, VAP, OMNI и пр.

Недостатки SolidWorks Plastics:

- отсутствие русификации модуля;
- отсутствие каталогов стандартных комплектующих, активно применяющихся на российских предприятиях: FODESCO, DME-EURO, FCPK;
- низкая эффективность расширения и обновления существующих библиотек стандартных деталей пресс-форм;
- высокая сложность в освоении и поэтапной эксплуатации;
- отсутствие возможностей формирования комплекта технической документации в соответствии с ЕСКД;
- высокая стоимость программного продукта.

Анализ приложения «Пресс-формы 3D» компании ASCON

Приложение «Пресс-формы 3D» встроено в CAD/CAM систему «Компас 3D» фирмы ASCON (Россия) и предназначено для автоматизации проектно-конструкторских и технологических работ проектирования пресс-форм для литья изделий под давлением из пластмассы, и формирования комплекта технической документации, необходимой для выпуска пресс-формы [13].

В ходе изучения приложения определено, что оно способно провести [13]:

- полный анализ трёхмерной модели детали;
- проектирование и расчёт формообразующих элементов;
- конструирование пакета пресс-формы в ручном режиме;
- автоматическое формирование конструкторской и технологической документации для сопровождения процесса изготовления пресс-формы и её конструктивных элементов (чертежи, спецификации, детализовки).

Последнее особенно важно в условиях развития отечественного машиностроительного производства в связи с необходимостью формирования документации в процесс компьютерной подготовки производства в полном соответствии с требованиями ЕСКД.

Также, приложение «Пресс формы 3D» включает в себя [13]:

- базу данных оборудования (более шестидесяти моделей термопластавтоматов);
 - базу знаний конструкций пресс-форм.
- Кроме того, и помощью приложения возможно проектировать различные конструкции пресс-форм, в частности [13]:
- пресс-формы с одной либо двумя параллельными плоскостями раскрытия;
 - конструкции пресс-форм «съем плитой» или «съем толкателями», при этом возможны их комбинации;
 - пресс-формы с боковым разъемом (ползунами);
 - пресс-формы с различными методами центрирования подвижной и неподвижной частей.

Приложение также позволяет изменить конструкцию элементов пресс-формы и их характеристики на любой стадии проектирования с целью полной адаптации возможностей инструментального производства и увеличения технологичности производственного процесса.

Проектирование пресс-формы для литья изделия из пластмассы с использованием приложения «Пресс формы 3D» содержит следующие этапы:

1. Анализ исходной детали. Проектирование начинается со взятия модели в работу командой «Начать проектирование». Автоматически создается файл, с которым идет дальнейшая работа. Начинается анализ детали с вызова пользователем команды «Анализ раскрываемости», при этом приложение по определенному алгоритму в автоматическом режиме распределяет поверхности к неподвижной или подвижной части детали, а модель, в свою очередь, подвергается проверке на наличие отрицательных уклонов. На данном этапе формируется линия раскрытия пресс-формы, которую

конструктор вправе редактировать вручную, как и решения программы по разнесению поверхностей к различным частям будущей пресс-формы.

Специальная команда «Заплата плоскости раскрытия» предназначена для построения заплаток на внутренних отверстиях изделия [13].

Следующим шагом является получение заготовки матрицы и пуансона в соответствии с проведенным разбиением поверхностей, который осуществляется с помощью команды «Полуматрицы» [13].

В конце первого этапа производится построение присоединительной точки с именем «Впрыск» на линии раскрытия, которая задает точку впрыска, а также, в случае необходимости, созданием эскиза, в котором вычерчивается форма и место расположения толкателей [13].

2. Моделирование литниковой системы. Приложение «Пресс-формы 3D» позволяет выбрать литниковую систему и учесть все ее особенности. С помощью модуля проектирования литниковой системы конструктор редактирует такие параметры, как угол впрыска, количество каналов литниковой системы, расположение её относительно подвижной и неподвижной части, а также параметры сечений каналов литников [13].

3. Проектирование пакета пресс-формы. Начинается данный этап с заполнения задания для проектирования пресс-формы. Перед пользователем появляется диалоговое окно, в котором он задает параметры технологического оборудования (термопластавтомата), тип конструкции и центрирования формы, а также определяет наличие дополнительной плоскости раскрытия для литниковой системы, предусматривает наличие охлаждающей системы [13].

При активации команды «Проектировать» в приложении запускается процесс расчета размеров деталей пресс-формы, по результатам которого формируется математическая модель пресс-формы. На экране конструктор видит упрощенное изображение пресс-формы с характерными точками ре-

дактирования, которые задают определенные параметры, и может изменить любое решение, предложенное системой, после чего выполнить команду «Пересчитать» [13].

4. На заключительном этапе с помощью специальных команд осуществляется генерация трёхмерных моделей и 2D чертежей, которые позволяют получить всю необходимую конструкторско-технологическую документацию [12].

Таким образом, прикладная библиотека «Пресс-формы 3D» позволяет в автоматизированном режиме сопровождать проектирование и производство пресс-форм для литья пластмассы, что доказывает эффективность применения данной CAD/CAM системы [14, 15].

Преимущества приложения «Пресс-формы 3D»:

- удобный и эргономичный инструмент, полностью сопровождающий процесс автоматизированного проектирования пресс-форм;
 - разработчиком является российская компания, а следовательно - полная русификация программы и эффективная техническая поддержка пользователей;
 - поддержка стандартов ЕСКД при разработке технической документации;
 - относительно низкая стоимость внедрения системы на предприятии.
- Недостатки приложения «Пресс-формы 3D»:
- отсутствие библиотек стандартных конструктивных элементов
 - пресс-форм современных производителей – DME, HASCO, LKM и других, занявших активную позицию на Российском рынке;
 - слабая адаптивность программы при проектировании одной пресс-формы для изготовления разных деталей.

Анализ MoldDesign – интегрированной среды разработки Autodesk Inventor Professional (США)

Для проектирования пресс-форм в Inventor имеется интегрированная среда Mold Design, которая включает набор интел-

лектуальных инструментов создания и управления в ленте и браузер Mold Design. Элементы в ленте расположены на трех вкладках: «Компоновка пресс-формы», «Пуансон/матрица», «Сборка пресс-формы». Расположение команд во вкладках соответствует последовательности создания пресс-формы, что очень удобно при проектировании. Браузер Mold Design наглядно отображает в иерархической структуре данные проекта пресс-формы и позволяет управлять этими данными, в том числе обеспечивает альтернативный доступ к функциям контекстного меню.

Процесс проектирования пресс-формы с помощью Inventor Mold Design состоит из следующих этапов:

1. Проектирование компоновки пресс-формы

Начинается данный этап с ориентации детали в пространстве и выбора материала. В базе данных Autodesk Inventor представлены более 500 компаний-производителей пластмасс, охватывающих порядка 8000 наименований материалов [16]. На этом этапе также задаются основные физические параметры процесса изготовления детали: температуру пресс-формы и расплава, максимальное давление и режим впрыска. С целью корректировки размеров пресс-формы для каждой детали назначается коэффициент усадки детали.

Далее осуществляется работа над матрицей и пуансоном – задание их параметров как двух основополагающих деталей будущей пресс-формы, а также определение расположения шейки питателя. Конструктором определяется оптимальная поверхность разъема, по которой происходит разделение общей заготовки на матрицу и пуансон за вычетом объема, занимаемого пластмассовой деталью. В процессе выполнения одноименной команды выполняется создание пуансона и матрицы [16].

Операция «Создать вставку» позволяет создавать и вставлять вставки в местах пресс-формы, наиболее нетехнологичных с точки зрения изготовления, таких как острые внутренние углы [16].

Выводы

В ходе сравнительного анализа были рассмотрены существующие программные решения, предназначенные для компьютерной подготовки производства пресс-форм для литья пластмасс под давлением. В настоящее время существуют три продукта от разных разработчиков CAD/CAM/CAE систем, для каждого из которых определены основные достоинства и недостатки.

Наиболее удобным и универсальным инструментом для проектирования является «Пресс-формы 3D» фирмы ASCON. Данное приложение внедрено в отечественную CAD/CAM систему «Компас-3D» и весьма неплохо справляется со своими задачами, однако нуждается в усовершенствовании. Был определен основной недостаток – отсутствие каталогов стандартных деталей пресс-форм некоторых современных производителей.

Список литературы

1. Даньков А.В. Исследование и анализ использования прикладной библиотеки САПР "КОМПАС 3D" при расчете размерных цепей / А.В. Даньков, А.Ю. Тараховский // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов Международной научно-практической конференции, г. Кемерово, 29-30 ноября 2017 г. – Кемерово: Изд-во Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачева, 2017. – С. 130-134.
2. Автоматизация помогает машиностроительным предприятиям преуспевать на конкурентном рынке // САПР и графика - 2018. № 11 (265). С. 78-81.
3. Таран Д.С. Применение программных продуктов компании АСКОН при проектировании малых ветрогенераторов / Д.С. Таран, А.Ю. Тараховский // В сборнике: Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. материалы международной научно-технической конференции. – Севастополь, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2015. С. 119-122.
4. Водолазская Н.В. О тенденциях устойчивого развития региональных производственных систем / Н.В. Водолазская // Проблемы и решения современной аграрной экономики: материалы XXI Международной научно-производственной в 2 т. Т. 2. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2017. – С. 186 – 187.
5. Саса Д.А. Особенности изготовления рамных изделий для специализированного подвижного состава путем создания компьютерного моделирования состояний объекта изделий / Д.А. Саса, А.Ю. Тараховский // В сборнике: Современные технологии: проблемы и перспективы. сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых ученых. Севастополь, 2020. С. 210-213.
6. Сабанин Д.В. Использование CAD/CAE/CAM систем для проектирования и изготовления технологической оснастки: на примере формообразующих деталей пресс-форм для литья металлов под давлением: Дисс. канд. техн. наук. - Москва, 2002. 129 с.
7. Феоктистов Д.С. Обзор программных средств для повышения эффективности проектирования пресс-форм / Д.С. Феоктистов // В сборнике: Новые горизонты. Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию БГТУ. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2019. - С. 351-354.
8. Шигаев Н.Н. Возможности SOLIDWORKS PLASTICS в полимерном производстве / Шигаев Н.Н. // Modern Science. 2020. № 6-4. С. 218-222.
9. Проектирование изделий из пластмасс в среде SolidWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18476. – Дата обращения: 06.06.2020. – Загл. с экрана.
10. Бысов С.А. Анализ пластмассовой детали "Корпус" при помощи программного обеспечения / С.А. Бысов, И.Э. Гинсар // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2019. № CB1 (25). С. 6-11.
11. Копелиович Д.И. Анализ возможностей модуля SOLIDWORKS PLASTICS для проектирования пресс-форм / Д.И. Копелиович, С.А. Кадушкина // Перспективы развития информационных технологий. 2016. № 30. С. 38-42.
12. Шишин А. SOLIDWORKS PLASTICS - анализ технологичности проектирования пресс-форм / А. Шишин // САПР и графика. 2013. № 11 (205). С. 40-41.
13. Пресс-формы 3d. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kompas.ru/source/info_materials/user-manuals/rukovodstvo-polzovatelya-press-formy-3d.pdf. – Дата обращения: 06.06.2020. – Загл. с экрана
14. Родиошкин М.Ю. Проектирование пресс-формы для изготовления детали "Корпус светодиодного светильника" в системе КОМПАС 3D / М.Ю. Родиошкин, В.С. Грузнова // В сборнике: Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. Материалы Международной научно-практической конференции. Ответствен-

- ный за выпуск О.А. Кувшинова. - Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2018. С. 296-300.
15. Щёкин А.В. Проектирование пресс-формы для изготовления детали "Шайба противогаса" в системе КОМПАС-3D / А.В. Щёкин, М.П. Могдарёв, С.Е. Маскайкина // В сборнике: МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА, ТЕХНИКА, ОБРАЗОВАНИЕ. материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Рузаевский институт машиностроения. 2017. С. 108-113.
 16. Разработка и анализ пресс-форм – в Autodesk Inventor это просто [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20503. – Дата обращения: 06.06.2020. – Загл. с экрана
 17. Проектирование пресс-форм в Autodesk Inventor Tooling – шаг за шагом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/20744>. – Дата обращения: 06.06.2020. – Загл. с экрана
 18. Пресс-формы 3d. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kompas.ru/source/info_materials/user-manuals/rukovodstvo-polzovatelya-press-formy-3d.pdf. – Дата обращения: 06.06.2020. – Загл. с экрана.
 19. Тараховский А.Ю. Вузовский чемпионат и демонстрационный экзамен по стандартам WORLDSKILLS: опыт и перспективы / А.Ю. Тараховский // Автоматизированное проектирование в машиностроении. - 2020. № 8. С. 51-53.
 4. Vodolazskaya N.V. O tendencijah ustojchivogo razvitiya regional'nyh proizvodstvennyh sistem / N.V. Vodolazskaya // Problemy i resheniya sovremennoj agrarnoj jekonomiki: materialy XXI Mezhdunarodnoj nauchno-proizvodstvennoj v 2 t. T. 2. – p. Majskij: FGBOU VO Belgorodskij GAU, 2017.– S. 186 – 187.
 5. Sasa D.A. Osobennosti izgotovlenija ramnyh izdelij dlja specializirovannogo podvizhnogo so-stava putem sozdaniya komp'juternogo modelirovaniya sostojanij ob#ekta izdelij / D.A. Sasa, A.Yu. Tarakhovskiy // V sbornike: Sovremennye tehnologii: problemy i perspektivy. sbornik statej vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii dlja aspi-rantov, studentov i molodyh uchjonyh. Sevastopol', 2020. S. 210-213.
 6. Sabanin D.V. Ispol'zovanie CAD/CAE/CAM sistem dlja proektirovaniya i izgotovlenija tehnologicheskoy osnastki: na primere formoobrazujushhih detalej press-form dlja lit'ja metallov pod davleniem: Diss. kand. tehn. nauk. - Moskva, 2002. 129 s.
 7. Feoktistov D.S. Obzor programmnyh sredstv dlja povyshenija jeffektivnosti proektirovaniya press-form / D.S. Feoktistov // V sbornike: Novye gorizonty. Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj 90-letiju BGTU. – Brjansk: Brjanskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2019. S. 351-354.
 8. Shigaev N.N. Vozmozhnosti SOLIDWORKS PLASTICS v polimernom proizvodstve / Shigaev N.N. // Modern Science. 2020. № 6-4. S. 218-222.
 9. Proektirovanie izdelij iz plastmass v srede Solid-Works [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18476. – Data obrashhenija: 06.06.2020. – Zagl. s jekrana.
 10. Bysov S.A. Analiz plastmassovoj detali "Korpus" pri pomoshhi programmno obespechenija / S.A. Bysov, I.Je. Ginsar // Jelektronnyj zhurnal: nauka, tehnika i obrazovanie. 2019. № SV1 (25). S. 6-11.
 11. Kopeliovich D.I. Analiz vozmozhnostej modulja SOLIDWORKS PLASTICS dlja proektirovaniya press-form / D.I. Kopeliovich, S.A. Kadushkina // Perspektivy razvitiya informacionnyh tehnologij. 2016. № 30. S. 38-42.
 12. Shishin A. SOLIDWORKS PLASTICS - analiz tehnologichnosti proektirovaniya press-form / A. Shishin // SAPR i grafika. 2013. № 11 (205). S. 40-41.
 13. Press-formy 3d. Rukovodstvo pol'zovatelya [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://kompas.ru/source/info_materials/user-manuals/rukovodstvo-polzovatelya-press-formy-3d.pdf. – Data obrashhenija: 06.06.2020. – Zagl. s jekrana
 14. Rodioshkin M.Ju. Proektirovanie press-formy dlja izgotovlenija detali "Korpus svetodiodnogo svetil'nika" v sisteme KOMPAS 3D / M.Ju. Rodioshkin, V.S. Gruznova // V sbornike: Jenergojeffektivnye i resursosberegajushhie tehnologii i sistemy. Materialy Mezhdunarodnoj

- nauchno-prakticheskoy konferencii. Otvetstvennyj za vypusk O.A. Kuvshinova. Saransk: Nacional'nyj issledovatel'skij Mordovskij gosudarstvennyj universitet im. N.P. Ogarjova, 2018. S. 296-300.
15. Shhjokin A.V. Proektirovanie press-formy dlja izgotovlenija detali "Shajba protivogaza" v sisteme KOMPAS-3D / A.V. Shhjokin, M.P. Mogdarjov, S.E. Maskajkina // V sbornike: MASHINOSTROENIE: NAUKA, TEHNIKA, OBRAZOVANIE. materialy XI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ruzaevskij institut mashinostroenija. 2017. S. 108-113.
16. Razrabotka i analiz press-form – v Autodesk Inventor jeto prosto [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://isicad.ru/articles.php?article_num=20503. – Data obrashhenija: 06.06.2020. – Zagl. s jekrana
17. Proektirovanie press-form v Autodesk Inventor Tooling – shag za shagom [Jelektronnyj re-surs]. – Rezhim dostupa: <https://sapr.ru/article/20744>. – Data obrashhenija: 06.06.2020. – Zagl. s jekrana
18. Press-formy 3d. Rukovodstvo pol'zovatelja [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://kompas.ru/source/info_materials/user-manuals/rukovodstvo-polzovatelya-press-formy-3d.pdf. – Data obrashhenija: 06.06.2020. – Zagl. s jekrana.
19. Tarakhovskiy A.Yu. Vuzovskij chempionat i demonstracionnyj jezkamen po standartam WORLDSKILLS: opyt i perspektivy / A.Yu. Tarakhovskiy // Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii. 2020. № 8. S. 51-53.

УДК 678.01

АНАЛИЗ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ, И ОСОБЕННОСТИ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ

А.С. Фарниев¹, П.А. Новиков¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г.Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В данной статье рассмотрены наиболее распространенные материалы, используемые при формировании изделий по технологиям моделирования методом наплавления (FDM) и лазерной стереолитографии (SLA). Данные технологии позволяют получать детали сложной конфигурации при относительно высокой производительности и низких затратах ресурсов. Материалы, используемые в технологии FDM, являются термопластами – полимерными материалами, способными обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное либо вязкотекучее состояние, а материалы, применяемые в SLA технологии – фотополимерные смолы, способные затвердевать при воздействии ультрафиолетового излучения. В статье были описаны основные физико-механические свойства данных материалов и проанализированы преимущества и недостатки применения того или иного вида материала. Исходя из свойств рассматриваемых материалов был сделан вывод о возможности формирования внутренних резьб в изделиях из ABS-пластика, PETG-пластика и «прочной смолы» производителя Formlabs. Из-за своих свойств данные материалы могут использоваться не только для прототипирования объектов, но и в качестве корпусных деталей, а также могут работать в составе различных устройств. Проанализированы особенности влияния данных материалов на формирования внутренних резьб непосредственно во время печати изделия или в случае механической обработки изделия метчиками. Были сделаны выводы об особенностях формирования внутренних резьб из рассматриваемых материалов и целесообразности их механической обработки.

Ключевые слова: аддитивные технологии, внутренние резьбы, термопласты, ABS-пластик, PETG-пластик, фотополимерные смолы, механическая обработка, метчики

ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF MATERIALS USED IN ADDITIVE TECHNOLOGIES AND THE PECULIARITIES OF THEIR INFLUENCE ON THE FORMATION OF INTERNAL THREADS

A.S. Farniev¹, P.A. Novikov¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

This article discusses the most common materials used in the formation of products using fused deposition modeling (FDM) and laser stereolithography (SLA) technology. These technologies make it possible to obtain parts of complex configuration with a relatively high productivity and low resource costs. The materials used in the FDM technology are thermoplastics - polymeric materials that can reversibly pass when heated to a highly elastic or viscous state, and the materials used in SLA technology are photopolymer resins that can harden when exposed to ultraviolet radiation. The main physical and mechanical properties of these materials were described and the advantages and disadvantages of using one or another type of material were analyzed. Based on the properties of the materials under consideration, it was concluded that it is possible to form internal threads in products made of ABS plastic, PETG plastic and "durable resin" manufactured by Formlabs. Due to their properties, these materials can be used not only for prototyping objects, but also as body parts, and can work as part of various devices. The features of the influence of these materials on the formation of internal threads directly during the printing of the product or in the case of mechanical processing of the product with taps are analyzed. Conclusions were made about the features of the formation of internal threads from the materials under consideration and the feasibility of their mechanical processing.

Keywords: additive technologies, internal threads, thermoplastics, ABS plastic, PETG plastic, photopolymer resins, machining, taps.

Введение

Развитие современного машиностроения требует применения новых технологий, повышающих гибкость производства и качество продукции при низких затратах ресурсов.

На сегодняшний день перспективной тенденцией развития машиностроения является применение аддитивных технологий. Данные технологии позволяют получать детали сложной конфигурации при относительно высокой гибкости производства и низких затратах материала.

Наиболее широко распространёнными аддитивными технологиями на сегодняшний день являются:

- Лазерная стереолитография (SLA) – объект формируется из специального жидкого фотополимера, затвердевающего под действием лазерного излучения;

- Моделирование методом наплавления (FDM) – объект формируется путём послойной укладки расплавленной нити из плавкого рабочего материала (пластик, воск) [1].

Важной задачей является сборка деталей, изготовленных по данным технологиям, что можно осуществить при формировании в них внутренних резьб.

Для определения возможности формирования внутренних резьб в деталях, изготовленных аддитивными технологиями, необходимо рассмотреть свойства материалов из которых формируются данные детали.

Основные свойства материалов, используемых в аддитивных технологиях

Наиболее распространёнными на сегодняшний день материалами, используемыми для формирования объектов по технологии FDM, являются:

- ABS-пластик (АБС – акрилонитрил бутадиен стирол);
- PLA-пластик (ПЛА – полилактид);
- PETG-пластик (ПЭТГ – полиэтилен-терефталат-гликоль).

Данные материалы являются термопластами (полимерные материалы, способные

обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное либо вязкотекучее состояние). Термопласты допускают формование изделий из расплава с его последующим охлаждением и затвердеванием, а также могут перерабатываться многократно. Это, в свою очередь, позволяет возвращать в производственный цикл отходы производства, брак, изделия, утратившие потребительскую ценность [5].

Основные характеристики термопластиков, используемых в аддитивных технологиях представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики термопластиков, используемых в аддитивных технологиях

Характеристики	Значения		
	PLA	ABS	PTEG
Температура плавления, °C	180	210	225
Температура размягчения, °C	50	100	80
Температура эксплуатации изделий, °C	-20+40	-40+80	40+70
Температура стеклования, °C	65	105	80
Твердость (по Роквеллу)	R70-R90	R110	R106
Относительное удлинение при разрыве	3,8%	6%	50%
Прочность на изгиб, МПа	55,3	41	76,1
Прочность на разрыв, МПа	57,8	22	36,5
Модуль упругости при растяжении, ГПа	3,3	1,6	2,6
Модуль упругости при изгибе, ГПа	2,3	2,1	1,12
Плотность, г/см³	1,25	1,1	1,3
Точность печати	±0,1%	±1%	±0,1%
Усадка при изготовлении изделий	нет	до 0,8%	нет
Влагопоглощение	0,2-0,4%	0,45%	0,12%

Для выбора материала из которого будет сформирована деталь необходимо опреде-

литься с назначением детали. Также важны технические характеристики используемого оборудования, поскольку материалы имеют разные свойства и соответственно разные требования к печати такие как: наличие или отсутствие у оборудования подогреваемой платформы и закрытой камеры.

PLA-пластик и PETG-пластик не имеют усадки при формировании объекта, что позволяет получить более точное соответствие размеров напечатанного изделия смоделированному в отличие от ABS-пластика, который имеет наименьшую точность печати.

Основными недостатками применения PLA-пластика является узкий температурный диапазон использования полученных изделий и влияния ультрафиолета на прочность изделий.

ABS-пластик имеет хорошее сочетание прочности и упругости, что позволяет использовать его для изготовления механических изделий, рассчитанных на долгий срок эксплуатации. Широкий диапазон используемых температур позволяет эксплуатировать изделия из него в технических целях [3].

ABS-пластик возможно обрабатывать механически без значительных деформаций материала, что позволяет формировать из него корпусные детали с их дальнейшей механической обработкой.

Основными недостатками применения ABS-пластика является невысокая точность формирования изделия и необходимость в дальнейшей механической обработке изделия для удовлетворения требуемого качества.

Также при использовании ABS существенной проблемой является деформация пластика при контакте с поверхностью печати. Эту проблему возможно устранить, если подогревать саму поверхность печати, которая при этом должна быть гладкой, плоской и чистой [4].

PETG-пластик имеет более широкий температурный диапазон использования полученных изделий чем у PLA-пластика, но меньший чем у ABS-пластика. Также PETG-пластик в отличие от PLA-пластика не подвержен влиянию ультрафиолетовых излуче-

ний, что позволяет использовать его в тех же условия что и ABS-пластик.

SLA технология является более точной чем технология FDM и позволяет получать изделия с гладкими поверхностями без шероховатостей и высокой детализацией, что предотвращает необходимость в последующих операциях обработки полученных изделий

Аддитивная технология SLA в качестве материала формирования объекта использует фотополимерные смолы различных видов. Основные виды фотополимерных смол производителя Formlabs и их характеристики приведены в табл. 2 [2].

Таблица 2. Основные виды фотополимерных смол производителя Formlabs и их характеристики

Характеристики	Значения			
	«Стандартная» (Standard-art)	«Жесткая» (Tough)	«Прочная» (Durable)	«Термостойкая» (heat resistant)
Ударная вязкость по Изоду, Дж/м	25	38	109	14
Относительное удлинение при разрыве	6,2	24	49	2,0
Прочность на растяжение, МПа	65	55,7	31,8	51,1
Модуль упругости при растяжении, ГПа	2,8	2,8	1,26	3,6
Модуль изгиба, ГПа	2,2	1,6	0,82	3,3
Температура тепловой деформации при 0,45 МПа, °C	73	48	43	289

«Стандартная смола» довольно хрупкая, но имеет высокую прочность на растяжение, в связи с чем данная смола используется только для прототипирования

«Жесткая смола» имеет компромиссные характеристики между стандартной и прочной. Данная смола подходит для изготовления жестких деталей

«Прочная смола» имеет самый высокий показатель ударной вязкости и удлинением при разрыве по сравнению с другими материалами SLA, поэтому данная смола лучше всего подходит для изготовления деталей с подвижными элементами.

«Термостойкая смола» способна выдерживать высокие температуры, но очень хрупкая, поэтому используется только для прототипирования объектов, на которые будут воздействовать высокие температуры.

Особенности влияния материалов, используемых в аддитивных технологиях, на формирование внутренних резьб

Исходя из рассмотренных свойств материалов можно сделать вывод, что внутренние резьбы имеет смысл формировать в изделиях, изготовленных из ABS-пластика, PETG-пластика и «прочной смолы» производителя Formlabs, так как другие материалы используются только для прототипирования.

ABS-пластик имеет низкую точность при формировании объекта из-за наличия усадки материала при печати, поэтому резьбы полученные непосредственно при формировании деталей будут иметь низкое качество. С уменьшением шага резьбы качество резьбы будет ухудшаться. Подобная зависимость будет наблюдаться и при уменьшении диаметра резьбы.

С другой стороны, получить более качественные резьбы в деталях, изготовленных из ABS-пластика можно при механической обработке, поскольку ABS-пластик имеет высокие показатели прочности и упругости его можно обрабатывать режущим инструментом. Таким способом можно нарезать внутренние резьбы в заранее подготовленных отверстиях с помощью метчиков для

пластмассовых изделий. Качество получаемой резьбы будет зависеть от пористости изделия приобретенной в процессе его формирования.

PETG-пластик имеет более высокую точность при формировании объекта так как не имеет усадки материала, поэтому внутренние резьбы полученные непосредственно при формировании изделия из PETG-пластика будут иметь точность выше чем полученные таким же методом у ABS-пластика.

Однако формирование резьбы механическим методом в PETG-пластике будет осложнено из-за его низкой температуры размягчения и высокой вязкости. При формировании внутренней резьбы таким способом необходимо сохранять температуру в зоне контакта режущего инструмента и материала ниже 80°C, чтобы не повлечь температурные деформации.

«Прочная смола» производителя Formlabs обладает наибольшей точностью при формировании изделия, так как сама технология SLA превосходит по точности технологию FDM. С помощью технологии SLA из данной смолы можно получать довольно точные изделия. Внутренние резьбы сформированные непосредственно при печати изделия из «прочной смолы» будут превосходить по точности, таковые сформированные из ABS-пластика и PETG-пластика.

Однако «прочная смола» производителя Formlabs имеет низкую температуру тепловой деформации материала, поэтому нарезание внутренней резьбы метчиками в данном материале должна производиться при низких температурах в зоне контакта инструмента и изделия

Выводы

В статье были рассмотрены основные свойства материалов, используемых при формировании изделий по технологиям FDM и SLA. Был сделан вывод, что наиболее предпочтительными материалами для формирования внутренних резьб являются: ABS-пластик, PETG-пластик и «прочная смола» производителя Formlabs.

Из-за своих свойств данные материалы могут использоваться не только для прототипирования изделий, но и в качестве корпусных деталей, а также могут работать в составе различных устройств.

Наиболее точными при формировании получаются изделия из «прочной смолы» производителя Formlabs, но такие изделия сложно обрабатывать механически, поэтому целесообразнее получать в них внутренние резьбы непосредственно при формировании детали, а не механической обработкой.

Менее точными формируются изделия из PTEG-пластика, но в них возможно получать резьбы при помощи механической обработки метчиками.

Наименее точными при формировании являются изделия из ABS пластика, но благодаря высоким механическим свойствам в них можно нарезать резьбы с помощью метчиков.

Список литературы

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М.: ГИЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. – 220 с.
2. Выбираем жидкий фотополимер для 3D принтера. Классификация материалов для SLA/DLP 3D печати [Электронный ресурс] URL: <https://3dtool.ru/stati/vybiraem-zhidkiy-fotopolimer-dlya-3d-printera-klassifikatsiya-materialov-dlya-sla-dlp-3d-pechati/> – Дата обращения: 25.10.2020
3. Подробный гид по выбору пластика для 3D-печати [Электронный ресурс] URL: <https://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlja-3d-pechati.html> – Дата обращения: 25.10.2020
4. Сравнение ABS, PLA, SBS, PETG. Различия пластиков: свойства, хранение, применение [Электронный ресурс] URL: <https://rusabs.ru/blogs/blog/razlichie-mezhdu-abs-i-pla-dlya-3d-pechati> – Дата обращения: 25.10.2020
5. Крыжановский В.К. Технические свойства полимерных материалов: Учеб. справ. пособие / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с., ил.
6. Нефёлов И.С. Особенности изготовления и структура резьбовых поверхностей в деталях, изготовленных методами 3D-печати / И.С. Нефёлов, Н.И. Баурова // Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. «Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях». – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. – С. 169-176

7. Смуров, И. Ю. Экспериментальное аддитивное прямое производство с помощью лазера / И. Ю. Смуров, И. А. Мовчан, И. А. Ядройцев [и др.] // Вестник МГТУ «Станкин». – 2012. – № 2 (20). – 48 – 50.
8. Слюсар, В.И. Фаббер-технологии: сам себе конструктор и фабрикант / В.И.Слюсар // Конструктор. – 2002. – № 1. – 5 – 7.
9. Валетов, В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учебное пособие / В.А. Валетов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
10. Пырх, Т. В. Свойства разбавленных растворов высокомолекулярного полилактида / Т. В. Пырх, А. А. Мажеева, О. В. Зайцева // Успехи в химии и хим. технологии. – 2008. – Т. 22, № 5. – С. 70 – 73.

References

1. Zlenko M.A. Additive technology in mechanical engineering / M.V. Nagaicev, V.M. Dovbysh // posobie dlya inzhenerov. – M.: GNC RF FGUP «NAMI» 2015. – 220 p.
2. Choosing a liquid photopolymer for a 3D printer. Classification of materials for SLA / DLP 3D printing [Electronic resource] URL: <https://3dtool.ru/stati/vybiraem-zhidkiy-fotopolimer-dlya-3d-printera-klassifikatsiya-materialov-dlya-sla-dlp-3d-pechati/> (accessed: 25.10.2020)
3. A detailed guide to choosing plastic for 3D printing [Electronic resource] URL: <https://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlja-3d-pechati.html> (accessed 25.10.2020)
4. Comparison of ABS, PLA, SBS, PETG. The difference between plastics: properties, storage, application [Electronic resource] URL: <https://rusabs.ru/blogs/blog/razlichie-mezhdu-abs-i-pla-dlya-3d-pechati> (accessed 25.10.2020)
5. Kryzhanovsky V.K. Technical properties of polymeric materials: Textbook. ref. allowance / V.K. Kryzhanovsky, V.V. Burlov, A.D. Panimatchenko, Yu.V. Kryzhanovskaya. - 2nd ed., Rev. and add. - SPb.: Professiya, 2005. – 248 p.
6. Nefyolov I.S (Features of manufacture and structure of threaded surfaces in parts made by 3D printing) / I.S Nefyolov, N.I. Baurova // Sb. tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Energo-resursoberegayushie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otroslyakh». – Belgorod : Izd-vo BGTU, 2017. – S. 169-176.
7. Smurov, I. Yu. Experimental additive direct production using a laser / I. Yu. Smurov, IA Movchan, IA Yadroytsev [et al.] // Vestnik MGTU "Stankin". – 2012. – No. 2 (20). – 48 – 50.
8. Slyusar, V.I. Fabber technologies: his own designer and manufacturer / V.I.Slyusar // Konstruktor. – 2002. – No. 1. – 5 – 7.
9. Valetov, V.A. Additive technologies (state and prospects): ucheb. posobie / V.A. Valetov. – SPb.: ITMO University, 2015. – 63 p.
10. Pyrh, T. V. Properties of diluted solutions of high molecular weight polylactide / T. V. Pyrh, A. A. Mazheeva, O. V. Zaitseva // Uspekhi v himii i him. tekhnologii. – 2008. – T. 22, No. 5. – S. 70 – 73.

УДК 621.9

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ ЖАРОПРОЧНЫХ, НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Т.А. Дуюн¹, В.М. Пчелкин¹, И.А. Дуюн¹

¹ ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г.Белгород, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрена методика прогнозирования износа режущего инструмента при точении жаропрочных, нержавеющей сталей, сложностью обработки которых является повышенный износ в связи с особенностями их физико-механических свойств. Принято предположение о преобладающей форме адгезионного износа. При прогнозировании износа предлагается учитывать влияние температуры резания, степени и скорости пластической деформации на предел текучести обрабатываемого материала. В качестве примера представлены результаты расчетов при точении жаропрочной, коррозионностойкой стали 08X18H10T: зависимости теплового состояния от скорости резания, изменение предела текучести под действием температуры, степени и скорости деформации, приращение в процессе обработки площадки износа режущего инструмента по задней поверхности в различных технологических условиях.

Ключевые слова: прогнозирование износа, тепловое и деформационное воздействие, точение жаропрочных, нержавеющей сталей.

PREDICTING CUTTING TOOL WEAR WHEN TURNING HEAT-RESISTANT, STAINLESS STEELS

Т.А. Duyun¹, V.M. Pchelkin¹, I.A. Duyun¹

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova, Belgorod, Russian Federation

Abstract

The article describes a method for predicting the wear of cutting tools when turning heat-resistant, stainless steels. The complexity of processing these steels is increased wear, which is associated with the peculiarities of their physical and mechanical properties. It is assumed that the predominant form of adhesive wear. When predicting this wear, it is proposed to take into account the influence of the cutting temperature, the degree and rate of plastic deformation on the yield strength of the processed material. As an example, the results of calculations in turning of high-temperature, corrosion-resistant steel 08KH18N10T: this is based on the thermal state of the cutting speed, the change of yield strength under the effect of temperature, degree and rate of deformation, the increment of processing pad wear of the cutting tool on the back surface in various process conditions. Key words: prediction of wear and tear, heat deformation and impact, turning, heat-resisting, stainless steels.

Keywords: prediction of wear and tear, heat deformation and impact, turning, heat-resisting, stainless steels.

Обработка резанием жаропрочных, нержавеющей сталей, таких как 08X13, 08X18H10T, 12X18H10T, 20X23H13 имеет ряд существенных особенностей, усложняющих процесс резания: повышенная прочность и твердость, высокие температурные показатели резания,

повышенная истирающая способность, пониженная виброустойчивость [1–5]. Высокая упрочняемость жаропрочных, нержавеющей сталей обусловлена особенностями строения их кристаллической решетки и низкими значениями отношения расчетного предела

текучести к пределу прочности, что вызывает образование упрочненного слоя в процессе резания. Низкая теплопроводность приводит к увеличенной температуре в зоне контакта режущего инструмента и заготовки, активации явлений адгезии и диффузии, интенсивному схватыванию контактных поверхностей. Сохранение исходной прочности и твердости при увеличении температуры приводит к высоким удельным давлениям на режущие кромки инструмента. Увеличенная истирающая способность жаропрочных, нержавеющих сталей вызвана наличием в них частиц твердых форм, образующих интерметаллидные или карбидные включения и действующих на режущие кромки инструмента как абразив. Одновременно с твердыми частицами действуют свободные металлы, соединённые с углеродом, образующиеся в результате структурных преобразований кристаллической решетки при пластической деформации. Пониженная виброустойчивость в зоне резания обусловлена высокой упрочняемостью поверхностного слоя и неравномерностью протекания процессов отрыва стружки, её деформирования и отвода из зоны резания. Вышеперечисленные факторы приводят к интенсивному сложно прогнозируемому износу металлорежущего инструмента. Поэтому выявление закономерностей, действующих в процессе резания, стружкообразования и теплопередачи с целью повышения стойкости инструмента является важной актуальной задачей [3–10].

Процессы резания металлов сопровождаются протеканием сложных физических явлений: механических, тепловых, электрических, химических, адгезионных, диффузионных и других. Важным параметром для исследования и прогнозирования износа режущего инструмента, является температура в зоне резания и направления движения тепловых потоков, поступающих в инструмент.

Для оценки теплового состояния процесса резания воспользуемся методикой профессора С.С. Силина, основой которой

является метод подобия с использованием безразмерных комплексов, критериев подобия [11].

Основными параметрами принятой схемы, определяющими процессы стружкоотделения, являются поверхность сдвига (плоскость скалывания) и угол сдвига (угол скалывания). Поверхность и угол сдвига связаны с физико-механическими и температурными явлениями, протекающими в зоне резания. Значение угла сдвига позволяет устанавливать ряд важнейших параметров процесса резания: силы, действующие на переднюю и заднюю поверхность металлорежущего инструмента, коэффициент трения по передней и задней поверхности инструмента, длину контакта стружки с инструментом, контактные напряжения на передней и задней поверхности режущей кромки.

Определить экспериментально положение плоскости или величину угла скалывания достаточно сложно. Однако эти параметры связаны неразрывно с величиной усадки стружки. Усадка стружки является вполне корректным параметром процесса стружкообразования, характеризующим соотношение между скоростями и степенью деформации, а также тепловыми параметрами процесса резания.

Усадка стружки характеризует степень пластической деформации в процессе стружкообразования, которая состоит в непрерывном последовательном перемещении элементарных объемов массы металла в направлении плоскостей сдвига.

Первопричиной возникновения тепловых процессов являются механические явления, происходящие в зоне резания, преобразующие упругопластические деформации обрабатываемого металла в тепловую энергию. Последовательным проявлением тепловой энергии являются температурные поля в обрабатываемом материале, стружке и режущем инструменте, которые в свою очередь изменяют физико-механические и теплофизические показатели обрабатываемого материала, форму протекания упругих и пластических деформаций, обуславливают значения

напряжений и силы резания. Таким образом, механические и тепловые явления протекают практически одновременно, влияют взаимно друг на друга и должны учитываться во взаимосвязи.

На рис. 1 представлены зависимости теплового состояния режущих кромок инструмента от скорости резания при точении жаропрочной, коррозионностойкой стали 08X18H10T (глубина резания 1 мм, подача 0,16 мм/об). Для построения зависимостей в качестве исходных данных использованы экспериментально полученные значения усадки стружки.

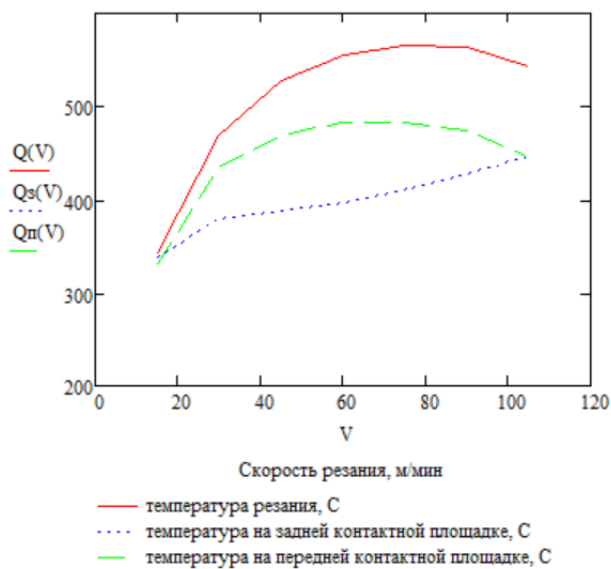


Рис. 1. Тепловое состояние режущих кромок инструмента при точении стали 08X18H10T

С увеличением скорости резания увеличивается итоговый удельный тепловой поток в изделие, так как увеличиваются все составляющие: возрастает тепловой поток от трения по задней поверхности резца, увеличивается поток от теплоты деформации, а также итоговый тепловой поток по передней и задней поверхности. Однако, с увеличением скорости резания увеличивается относительное количество тепла, уходящее со стружкой. Поэтому температура резания и температура на передней контактной площадке инструмента с увеличением скорости резания первоначально возрастают, затем стабилизируются и при некоторых сочетаниях технологических параметров могут даже снижаться.

Зона сдвига формируется в результате пластических деформаций металла снимаемого припуска и поверхностного слоя под влиянием температуры и деформации. Как отмечалось выше процесс стружкообразования обусловлен физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, однако условия протекания этого процесса в свою очередь изменяют механические параметры. Скорость деформаций оказывает существенное влияние на предел текучести, кроме того, при высоких скоростях деформаций происходит явление адиабатического разогрева металла в зоне наибольших деформаций и, соответственно, его локальное разупрочнение.

Величина напряжений при пластической деформации материала формируется при одновременном действии двух процессов: процесса упрочнения, повышающего напряжение, и процесса отдыха, снимающего упрочнение и, следовательно, понижающего напряжение. При увеличении температуры отдых материала протекает более интенсивно, поэтому повышение температуры снижает напряжение деформации. Скорость деформации существенно влияет на процесс отдыха материала, он проявляется более полно при низких скоростях деформации, повышение скорости деформации приводит к увеличению напряжения. Таким образом, при высоких температурах и меньших скоростях деформации отдых материала протекает настолько интенсивно, что компенсирует его упрочнение.

Одной из наиболее известных моделей, описывающих поведение металла при пластических деформациях, является модель Джонсона-Кука в форме уравнения состояния Ми-Грюнайзена. Данная модель учитывает как кинематическое упрочнение, так и адиабатический разогрев деформируемого материала в виде зависимости напряжения от скорости деформирования и температуры. В этой модели, эквивалентное пластическое напряжение определяется выражением:

$$\sigma = (A + B \cdot \bar{\varepsilon}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}, \quad T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, \quad (2)$$

где A – предел текучести при медленном нагружении; B – изотропное (статическое) упрочнение, характеризующее чувствительность к деформации; $\bar{\varepsilon}$ – эквивалентная пластическая деформация; n – коэффициент, представляющий эффект упрочнения; C – коэффициент чувствительности к скорости деформации; $\dot{\varepsilon}$ – скорость пластической деформации; $\dot{\varepsilon}_0$ – скорость деформации при статических испытаниях; T_0 , T_m – температура окружающей среды и температура плавления материала соответственно; m – показатель степени, учитывающий явление термического разупрочнения материала.

Модель Джонсона-Кука позволяет моделировать сложное поведение материала при динамическом нагружении, сопровождающем процесс резания. Для определения параметров модели Джонсона-Кука необходимо иметь экспериментальные данные о динамических свойствах исследуемого материала. В табл. 1 представлены параметры модели Джонсона-Кука для коррозионностойкой стали 08X18H10T, полученные при проведении экспериментальных исследований [12].

Таблица 1. Параметры модели Джонсона-Кука для стали 08X18H10T

A , МПа	B , МПа	n	C
120	648	0,6958	0,0153
m	$\dot{\varepsilon}_p$	T_m , °C	T_0 , °C
1,178	0,2	900	20

С использованием выражений (1), (2) и параметров модели (табл.1) были получены зависимости изменения предела текучести стали 08X18H10T от температуры при различных значениях эффективной пластической деформации и скорости деформации, а также зависимости изменения предела текучести от эффективной пластической деформации при

различных значениях температуры (рис. 2, 3).

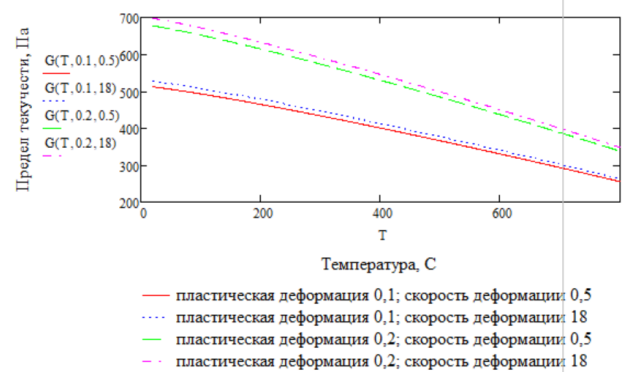


Рис.2. Зависимость предела текучести стали 08X18H10T от температуры при различных значениях эффективной пластической деформации и скорости деформации

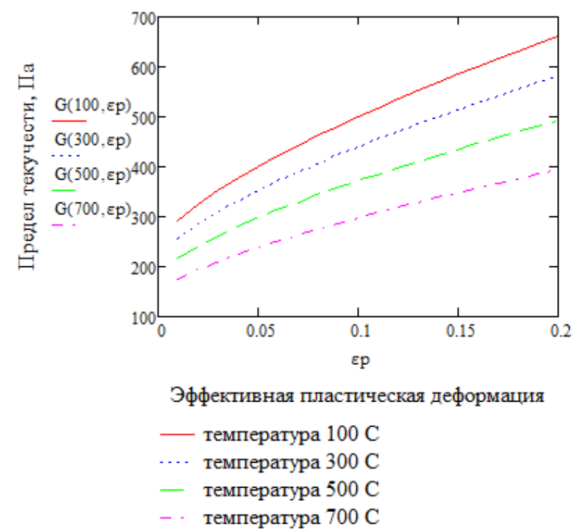


Рис.3. Зависимость предела текучести стали 08X18H10T от эффективной пластической деформации при различных значениях температуры

Анализируя представленные зависимости, можно сделать вывод, что температура и пластическая деформация оказывают существенное влияние на предел текучести: температура снижает предел текучести, а пластическая деформация его повышает. При этом скорость деформации не оказывает существенного влияния на предел текучести данной стали. Влияние условий резания на физико-механические свойства обрабатываемого материала необходимо учитывать при прогнозировании износа режущего инструмента.

Основываясь на предположении о преобладании адгезионного износа при

обработке жаропрочных нержавеющей сталей, воспользуемся для определения приращения высоты площадки износа по задней поверхности Δh_3 за время обработки следующим выражением [13–15]:

$$\Delta h_3 = \sqrt{2 \cdot p_1 p_2 \frac{V(1 - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \gamma)}{\operatorname{tg} \alpha}} \delta \tau, \quad (3)$$

где p_1 – вероятность образования адгезионных металлических связей (АМС) на исследуемой площадке контакта инструмента и обрабатываемой заготовки; p_2 – вероятность смещения зоны разрушения АМС в инструмент; V – скорость резания; α – задний угол режущего инструмента; γ – передний угол режущего инструмента; δ – толщина зоны разрушения АМС в инструменте; τ – время воздействия.

За толщину зоны разрушения АМС в инструменте, принимается толщина полос скольжения в металлах ($\delta \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м).

Для широкого спектра нержавеющей сталей:

$$\delta \approx 5 \cdot 10^{-9} \mu, \quad (4)$$

где μ – коэффициент трения материала заготовки с задней плоскостью металлорежущего инструмента $\mu \approx 0,4 \div 0,6$.

Вероятность образования АМС на рассматриваемой поверхности контакта инструмента и заготовки:

$$p_1 = (1 + q_k/q_3)^{-1}, \quad (5)$$

где q_k – среднее давление, необходимое для полного пластического смятия микронеровностей обрабатываемого материала заготовки на площадке контакта; q_3 – среднее давление на задней плоскости металлорежущего инструмента.

$$q_k = 2,5 \sigma_{\text{вн}} \left(1 - \frac{1}{2(1,385 - \gamma)} \right), \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{вн}}$ – предел прочности на сжатие материала режущей кромки металлорежущего инструмента при температуре резания.

$$q_3 = 0,5043 \cdot 0,5 \sigma_{\text{вн}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{вн}}$ – предел прочности материала применяемой заготовки при средней температуре на задней контактной площадке режущего инструмента.

Вероятность смещения зоны разрушения АМС в инструмент:

$$p_2 = (1 + \sigma_{\text{SM}}^2 / \sigma_{\text{SH}}^2)^{-1}, \quad (8)$$

где σ_{SM} , σ_{SH} – напряжения текучести материалов применяемой заготовки и режущей кромки металлорежущего инструмента при заданной температуре.

На рис.4 представлено приращение во времени площадки износа инструмента по задней поверхности при точении жаропрочной стали 08X18H10T в различных технологических условиях теплового и скоростного режимов. Зависимости получены с учетом теплового состояния и его влияния на изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала.

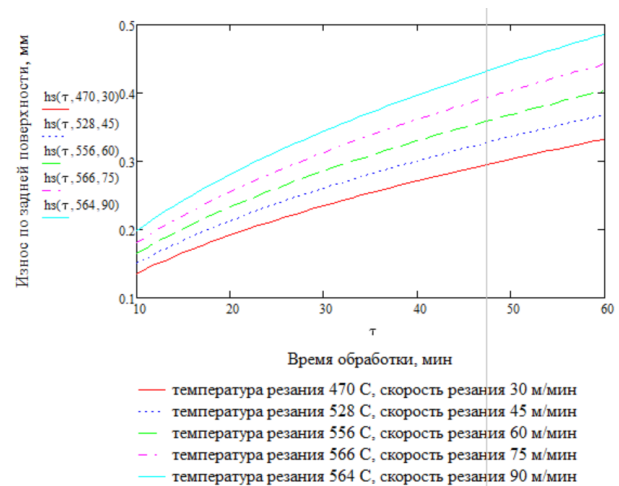


Рис.4. Приращение площадки износа инструмента по задней поверхности при точении стали 08X18H10T в различных технологических условиях

Представленная методика позволяет прогнозировать износ режущего инструмента при точении жаропрочных, нержавеющей сталей с учетом изменения физико-механических свойств обрабатываемого материала в процессе резания под воздействием тепловых и силовых факторов.

Список литературы

- Ивашенко А.П. Силы резания при лезвийной обработке режущим инструментом хромоникель-молибденовых сталей / А.П. Ивашенко // Фундаментальные исследования. – 2015. – №12. – С. 268–272.
- Виноградов А.А. О расчете сил резания и характеристик контактного взаимодействия стружки с инструментом при резании пластичных металлов

- / А.А. Виноградов // Сверхтвердые материалы. – 2013. – №3. – С. 71-82.
3. Липатов А.А. Температурно-силовые характеристики контактного взаимодействия на площадке износа задней поверхности инструмента при точении астенитной стали / А.А. Липатов, Ю.Л. Чигиринский, С.И. Кормилицин // Обработка металлов. – 2012. – №2(55). – С. 38-41.
 4. Пчёлкин В. М. Эмпирические модели износостойкости твердосплавных пластин при точении коррозионностойкой жаропрочной стали / В.М. Пчёлкин, Т.А. Дуюн // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №12. – С. 126-131.
 5. Пчёлкин В.М. Износостойкость твердосплавных пластин с многослойными покрытиями в различных технологических условиях точения жаропрочной стали / В.М. Пчёлкин, Дуюн Т.А. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – №1. – С.94-100.
 6. Мокрицкий Б.Я. Результаты сравнительного исследования работоспособности режущих инструментов при обработке специализированных нержавеющей сталей / Б.Я. Мокрицкий, А.Г. Серебренникова // Вестник ИрГТУ. – 2018. – Т. 22, №12. – С. 96-103.
 7. Солодков В.А. Особенности износа задней поверхности при прерывистом резании / В.А. Солодков, М.А. Тибиркова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, №1(3). – С. 650-653.
 8. Жигалов А.Н. Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А.Н. Жигалов // Вестник БарГУ. Серия: технические науки. – 2019. – №7. – С. 49-63.
 9. Каштальян И.А. Имитационная модель системы диагностирования и коррекции режущего инструмента на токарных станках с числовым программным управлением / И.А. Каштальян, А.А. Козорез, А.В. Шпак // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – 2010. – №8. – С. 39-48.
 10. Залого В.А. Определение стойкости инструмента и степени его износа по уровню звука, сопровождающего процесс резания / В.А. Залого, В.В. Нагорный // Обработка материалов резанием. – 2013. – №2(74). – С. 14-22.
 11. Силин, С.С. Метод подбора при резании металлов. / С.С. Силин - М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
 12. Брагов А.М. Экспериментальное исследование и математическое моделирование поведения сталей марок Ст.3, 20Х13 и 08Х18Н10Т в широких диапазонах скоростей деформаций и температур / А.М. Брагов, Л.А. Игумнов, В.Б. Кайдалов, А.Ю. Константинов, Д.А. Лапшин, А.К. Ломунов, Ф.М. Митенков // Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56, №6. – С. 51-58.
 13. Симсиве Ж.В. Прогнозирование износа твердосплавного режущего инструмента при высокоскоростной механической обработке / Ж.В. Симсиве, А.В. Кутышкин, Д.Ц. Симсиве // Обработка металлов. – 2011. – №2(51). – С. 23-26.
 14. Симсиве Ж.В. Оценка износа режущего инструмента при высокоскоростной механической обработке / Ж.В. Симсиве, А.В. Кутышкин, Д.Ц. Симсиве // Обработка металлов. – 2011. – №3(52). – С. 23-26.
 15. Шашок А.В. Прогнозирование адгезионного износа лезвийного режущего инструмента / А.В. Шашок, А.В. Кутышкин, Е.А. Фролов, И.В. Кожемяко // Обработка металлов. – 2011. – №1(50). – С. 23-26.

References

1. Ivashchenko A.P. Sily rezaniia pri lezviinoi obrabotke rezhushchim instrumentom khromonikel'mo-libdenovykh stalei / A.P. Ivashchenko // Fundamen-tal'nye issledovaniia. – 2015. – №12. – P. 268-272.
2. Vinogradov A.A. O raschete sil rezaniia i kharakteristik kontaktного vzaimodeistviia struzhki s instrumentom pri rezanii plastichnykh metallov / A.A. Vinogradov // Sverkhтвердые материалы. – 2013. – №3. – P. 71-82.
3. Lipatov A.A. Temperaturno-silovye kharakteristiki kontaktного vzaimodeistviia na ploshchadke iznosa zadnei poverkhnosti instrumenta pri tochenii astenitnoi stali / A.A. Lipatov, Iu.L. Chigirinskii, S.I. Kormilitsin // Obrabotka metallov. – 2012. – №2(55). – P. 38-41.
4. Pchelkin V. M. Empiricheskie modeli iznosostoičnosti tverdosplavnykh plastin pri tochenii korrozionnostoikoi zharoprochnoi stali / V.M. Pchelkin, T.A. Duiun // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. – 2016. – №12. – P. 126-131.
5. Pchelkin V.M. Iznosostoičnost' tverdosplavnykh plastin s mnogoslainymi pokrytiami v razlichnykh tekhnologicheskikh usloviakh tocheniia zharoprochnoi stali / V.M. Pchelkin, Duiun T.A. // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. – 2018. – №1. – P.94-100.
6. Mokritskii B.Ia. Rezul'taty sravnitel'nogo issledovaniia rabotosposobnosti rezhushchikh instrumentov pri obrabotke spetsializirovannykh nerzhaveiushchikh stalei / B.Ia. Mokritskii, A.G. Serebrenniko-va // Vestnik IrGTU. – 2018. – Т. 22, №12. – P. 96-103.
7. Solodkov V.A. Osobennosti iznosa zadnei poverkhnosti pri preryvistom rezanii / V.A. Solodkov, M.A. Tibirkova // Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. – 2011. – Т. 13, №1(3). – P. 650-653.
8. Zhigalov A.N. Matematicheskaia model' i me-todika parametricheskoii optimizatsii iznosa i re-sursnoi stoikosti rezhushchego tverdosplavnogo instrumenta, uprochnennogo aerodinamicheskim

- zvuko-vym metodom / A.N. Zhigalov // Vestnik BarGU. Seriya: tekhnicheskie nauki. – 2019. – №7. – P. 49-63.
9. Kashtal'ian I.A. Imitatsionnaya model' sistemy diagnostirovaniya i korrektsii rezhushchego instrumenta na tokarnykh stankakh s chislovym programm-nym upravleniem / I.A. Kashtal'ian, A.A. Kozorez, A.V. Shpak // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. – 2010. – №8. – P. 39-48.
 10. Zaloga V.A. Opredelenie stoikosti instrumenta i stepeni ego iznosa po urovniu zvuka, soprovozhdaushchego protsess rezaniya / V.A. Zaloga, V.V. Nagornyi // Obrabotka materialov rezaniem. – 2013. – №2(74). – P. 14-22.
 11. Silin, S.S. Metod podobiya pri rezanii metallov. / S.S. Silin - M.: Mashinostroyeniye, 1979. – 152 p.
 12. Bragov A.M. Eksperimental'noye issledovaniye i matematicheskoye modelirovaniye povedeniya staley marok St.3, 20Kh13 i 08Kh18N10T v shirokikh diapazonakh skorostey deformatsii i temperatur / A.M. Bragov, L.A. Igumnov, V.B. Kaidalov, A.Iu. Konstantinov, D.A. Lapshin, A.K. Lomunov, F.M. Mitenkov // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. – 2015. – T. 56, №6. – P. 51-58.
 13. Simsive Zh.V. Prognozirovaniye iznosa tverdospalnogo rezhushchego instrumenta pri vysokoskorostnoy mekhanicheskoy obrabotke / Zh.V. Simsive, A.V. Kutyshekin, D.Ts. Simsive // Obrabotka metallov. – 2011. – №2 (51). – P. 23-26.
 14. Simsive Zh.V. Otsenka iznosa rezhushchego instrumenta pri vysokoskorostnoy mekhanicheskoy obrabotke / Zh.V. Simsive, A.V. Kutyshekin, D.Ts. Simsive // Obrabotka metallov. – 2011. – №3 (52). – P. 23-26.
 15. Shashok A.V. Prognozirovaniye adgezionnogo iznosa lezviynogo rezhushchego instrumenta / A.V. Shashok, A.V. Kutyshekin, E.A. Frolov, I.V. Kozhemiako // Obrabotka metallov. – 2011. – №1 (50). – P. 23-26.

УДК 681.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИД.А. Саса¹, А.Ю. Тараховский¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация**Аннотация**

В данной статье описывается технология обратного инжиниринга. Применение обратного инжиниринга для предприятия в различных сферах деятельности. Представлены ключевые особенности реверсивного инжиниринга. Рассмотрена последовательность перехода от твердой детали к полигональной модели STL-формата, с помощью контрольно-измерительной машины. Указано программное обеспечение для перехода от полигональной модели к твердотельной модели. Рассмотрен процесс поэтапного обратного сканирования детали. Описано назначение и уникальность, а также ключевые особенности контрольно-измерительного манипулятора Hexagon Absolute Arm. Так же представлена последовательность проведения точечных контактных измерений детали для выявления отклонений после обработки.

Ключевые слова: обратный инжиниринг, сканирование, манипулятор, проектирование, измерительные машины, облако точек, полигональная модель.

USE OF THE MULTI-FUNCTIONAL MEASURING MANIPULATOR TO CONTROL THE PARAMETERS OBTAINED AFTER MECHANICAL PROCESSINGD.A. Sasa¹, A.Yu. Tarakhovskiy¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation**Abstract**

This article describes reverse engineering technology. Reverse engineering application for an enterprise in various fields of activity. Key features of reverse engineering are presented. The sequence of transition from a solid part to a polygonal model of STL-format is considered, using a control and measuring machine. The software for converting from a polygonal model to a solid model is indicated. The process of step-by-step reverse scanning of a part is considered. The purpose and uniqueness, as well as the key features of the control and measuring manipulator Hexagon Absolute Arm, are described. The sequence of conducting point contact measurements of the part to identify deviations after processing is also presented.

Keywords: reverse engineering, scanning, manipulator, design, measuring machines, point cloud, polygon model.

Введение

Одной из главных особенностей развития является решение проблем повышения эффективности и качества выпускаемой продукции. Требования к точности, надежности и долговечности машин, приборов и оборудования непрерывно возрастают, при этом особое значение приобретает задача повышения качества массовых деталей и изделий, значительная часть которых вы-

полняется на автоматических линиях. Важная роль в обеспечении высокого качества продукции автоматизированных производств принадлежит автоматическим устройствам, предназначенным для контроля размеров деталей в процессе обработки, регулирования уровня настройки станков, а также для контроля и сортировки готовой продукции.

Обратный инжиниринг – это современный метод разработки и последующего из-

готовления высокотехнологичных деталей, узлов и агрегатов машин и механизмов. В процессе работы технологического оборудования часто возникает ситуация, когда необходимо воссоздать какую-либо деталь механизма. При этом конструкторская документация отсутствует, а заказ новой оригинальной детали невозможен.

В таких случаях на помощь инженерам приходит обратный (реверсивный) инжиниринг. Обратный инжиниринг – это, по сути, работа по обратному воссозданию образца детали, инжинирингу с применением инновационных технологий анализа, а именно: лазерного высокоточного 3D-сканирования, спектральный анализ для абсолютно точного определения химического состава материала, изучение микрогеометрии (шероховатости) поверхностей, формы [1-2].

Процесс обратного инжиниринга

В общем случае обратный инжиниринг (Reverse engineering) означает процесс создания технической документации на основе имеющейся детали или конструкции. Иными словами, процесс проектирования идет в обратном направлении — от физического объекта к его абстрактному представлению. Он используется для воссоздания дорогостоящих деталей в приборостроении, оборонной промышленности, нефтегазовой, химической и энергетической отраслях.

Реверсивный инжиниринг используется для производства разнообразных деталей, таких как уплотнения, прокладки, детали корпуса или двигателя, и может быть применен при восстановлении работоспособности устаревшего оборудования и при проектировании новых конструкций на базе имеющихся.

“Реверс” изделия - творческий процесс, предполагающий, понимание технологий, принципа работы устройства, умения соединить все детали изделия так, чтобы достичь заданных характеристик работы. Инженер, занимающийся обратным инжинирингом, работает в некоторой степени как археолог. Перед ним стоит задача восстановить неизвестную технологию создания де-

тали, для получения точно такого же результата. Для этого они изучают как деталь работает, где применяется, какие могут быть способы создания копии.

Ключевой элемент процесса обратного инжиниринга – создание цифровой копии с помощью программного обеспечения CAD (computer-aided design, САПР). Цифровая копия создается вручную или с помощью технологии сканирования в САД-модель. После того как геометрия детали воспроизведена, инженеру необходимо выбрать технологию изготовления – традиционную или аддитивную.

На первом этапе производится сканирование детали. С помощью 3D сканера проводятся необходимые замеры и создается облако точек. Есть ряд средств измерения объектов при 3D-сканировании, например: лазерные сканеры, световые сканеры, координатно-измерительные машины (СММ) и промышленные КТ-сканеры. 3D сканер может быть совсем простым, как камера телефона, или сложным – с лазерным устройством на роботизированном манипуляторе.

Полученное с помощью сканера облако точек переводится в формат STL. Следует подчеркнуть, что после 3D-сканирования в распоряжении инженера имеется только полигональная модель, требующая обязательной доработки. Полигональная модель в отличие от твердотельной состоит только из плоскостей, не имеющих толщину. Зачастую данные сканирования содержат неточности и погрешности, поэтому необходим инструмент, позволяющий быстро и просто исправить 3D модель и сделать ее пригодной для последующей работы. Для перевода STL файла в 3D модель и ее последующего исправления можно использовать программное обеспечение Geomagic Design X или ANSYS Discovery SpaceClaim. В SpaceClaim имеются встроенные средства исправления STL файлов, которые позволяют в автоматическом режиме заполнить разрывы, мелкие отверстия, отсутствующие грани. После того, как получена точная 3D модель создана, инженер может подготовить деталь к традиционному производству с помощью CAM-приложения,

или передать геометрию в специализированное ПО для печати на 3D принтере [3-5].

Преимущества манипулятора

Манипулятор Hexagon Absolute Arm 7-осевой (рис.1) – это многофункциональный измерительный инструмент, обеспечивающий увеличение производительности высокоточных измерений за счет удобства использования и универсальности в применении.



Рис.1. Манипулятор Hexagon Absolute Arm

Манипулятор предназначен для точных контактных измерений, а также высококачественного лазерного сканирования при использовании лазерного сканера RS5, RS6 или RS-SQUARED.

Уникальность манипулятора заключается в том, что его конструкция состоит из шарниров, дающих возможность руке свободно вращаться и перемещаться. Измерительная рука содержит дисплей, который наглядно представляет результаты измерений.

7-осевая Hexagon Absolute Arm – это портативный измерительный манипулятор, для которого не требуется затрачивать время на калибровку и прогрев, следовательно, благодаря высокой производительности, достигается высокая точность.

Ключевые особенности:

- Легкое вращение ручек позволяют минимизировать трудозатраты оператора и повысить точность измерений
- Материал корпуса – углеродное волокно – обеспечивает устойчивость к внешним температурным изменениям

- Устройства HomeDock и SmartLock позволяют в промежутках между измерениями сложить и закрепить манипулятор, что защищает от повреждений щупы и сканеры.

- Установка щупов и сканеров без повторной калибровки

- Поддержка обратной связи с пользователем через Bluetooth посредством звуковых сигналов и вывода визуальной информации на дисплей.

Данный сканер дает возможность быстро сканировать детали и в собственном программном обеспечении (PolyWorks) выполнять сглаженную STL-модель, контролировать геометрические параметры деталей, сборочной оснастки и готовой продукции, а также для создания по данным сканирования 3D-моделей, полностью совместимых с CAD/CAM приложениями.

Таким образом, современный обратный инжиниринг позволяет быстро получать цифровые модели физических объектов, а затем создавать их дубликаты с помощью доступных технологий производства [6-8].

Особенности измерения отклонений с помощью манипулятора

Для измерения отклонений манипулятором необходимо закрепить деталь на плите, причем совпадение плоскостей самой детали и манипулятора необязательно. После установки детали необходимо произвести калибровку щупа контрольно-измерительной машины (КИМ). Щупом касаемся детали, которая имеет круглую форму, центр и радиус измерительного щупа определяется путем измерения прецизионной сферы [9-10].

Далее загружаем 3D модель в программу манипулятора, для анализа отклонений размеров (рис.2).

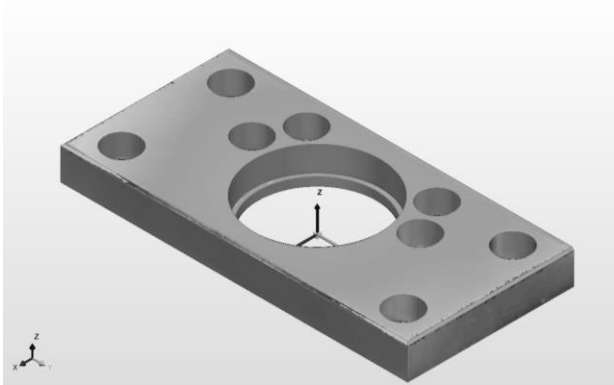


Рис.2. 3D модель губки тисков

Производим сканирование и измерение поверхности детали (рис. 3).

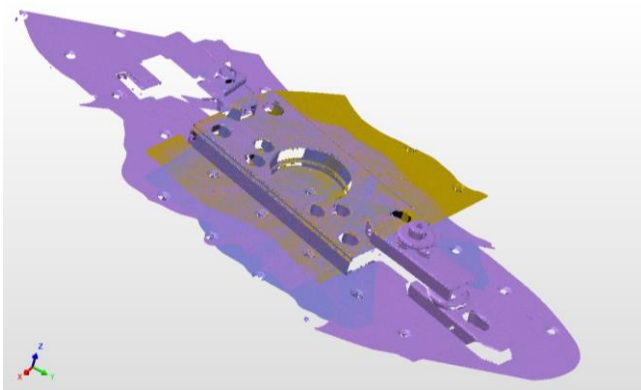


Рис.3. Сканирование губки тисков

После проведенного сканирования в программном обеспечении измерительной руки мы можем произвести наложение измеренной детали. Совмещаем по 3 осям координат отсканированную деталь и 3D модель (рис. 4).

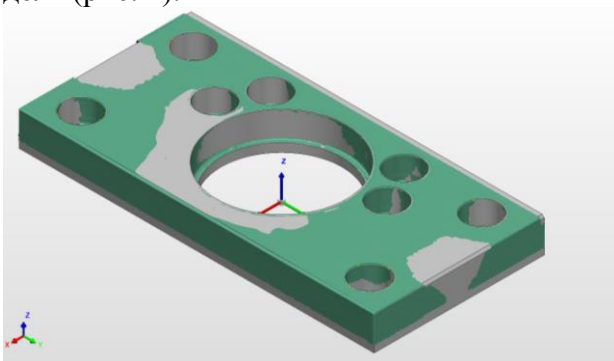


Рис.4. Наложение деталей

После наложения создаем сетку измерений. Для этого мы определяем базовую плоскость и прикасаемся к ней наконечником щупа. (рис. 5).

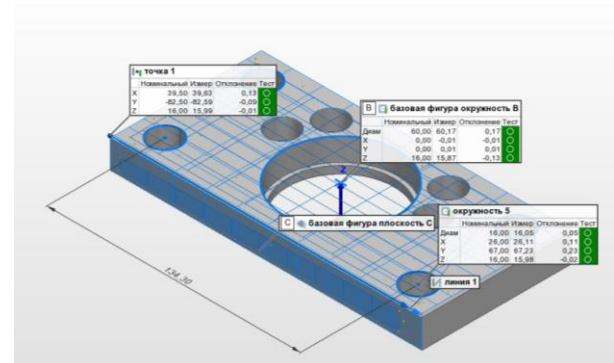


Рис.5. Создание сетки измерений

После наложения сетки и проведения дальнейших измерений положения точек осей отверстий, расстояния между гранями детали мы видим реальные значения размеров после обработки (рис. 6).

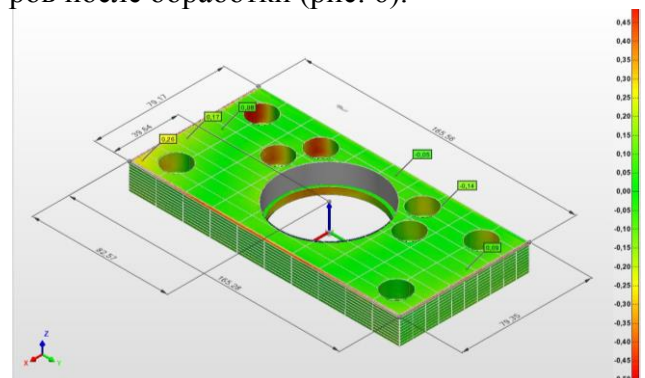


Рис.6. Определение реальных размеров детали

Далее после определения реальных размеров, а также положения плоскостей реальной детали создаем график отклонений в мм от 3D модели детали. В точках, где проводились измерения, мы видим в какую сторону и на какое расстояние сместились точки поверхности после обработки и закалки (рис. 7).

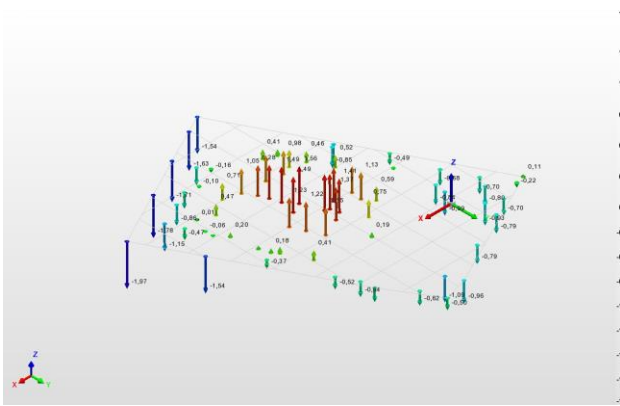


Рис.7 Смещение точек поверхности детали

Из графика следует, что максимальное отклонение губки после механической обработки и закалки составляет 1,97 мм, что является недопустимым значением.

Выводы

В рамках задачи обратного инжиниринга было выполнено лазерное трехмерное сканирование и измерение объекта, и на основе его скан-файла (облака точек) получены цифровая экспресс-модель, используемая для контроля геометрических параметров, и высокоточная объемная модель губки тисков, отвечающая требованиям создания промышленного производства.

Таким образом, современный обратный инжиниринг позволяет быстро получать цифровые модели физических объектов, а затем создавать их дубликаты с помощью доступных технологий производства. Так проводить высокоточные измерения в короткие сроки без сложных вспомогательных устройств. После проведения измерений можно сделать вывод, что нужно пересмотреть режимы обработки поверхностей, а также выбрать правильные температуры для закалки и производить равномерное погружение детали в охлаждающее вещество, чтобы деталь не деформировалась от тепловых напряжений.

Технологии трехмерного цветного лазерного сканирования различных объектов машиностроения позволяют эффективно решать актуальные инженерные задачи.

Список литературы

1. Тараховский А.Ю. Геометрическое моделирование и автоматизация процесса его изучения / А.Ю. Тараховский // Образование в цифровую эпоху: сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции преподавателей, студентов, аспирантов, докторантов и заинтересованных лиц, г. Нижний Новгород, 10-11 декабря 2019 г. - Нижний Новгород: Изд-во НГПУ им. Козьмы Минина, 2019. - С. 68-72.
2. СасаД.А., Тараховский А.Ю. Особенности изготовления рамных изделий для специализированного подвижного состава путем создания компьютерного моделирования состояний объекта изделий// СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ// сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных. Севастополь, 2020г – Изд-во ФГАОУВО “СевГУ”, 2020 г. – С. 210-213.
3. Водин, Д. В. Применение технологии обратного инжиниринга в машиностроении / Д. В. Водин. — Текст: непосредственный // Технические науки: проблемы и перспективы : материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2016 г.). — Санкт-Петербург: Свое издательство, 2016. — С. 67-69.
4. Обратный инжиниринг / Caduser.ru: информационный портал для профессионалов в области САПР. [Электронный ресурс] URL: https://www.caduser.ru/press/articles/cm_87_10.html - Дата обращения: 26.09.2020.
5. 3D сканирование и конструкторские услуги / Glavconstructor.ru информационный портал [Электронный ресурс] URL: <https://glavconstructor.ru/services/revers-engineering/> - Дата обращения: 26.09.2020.
6. Оборудование для обратного инжиниринга / Promgeo.com: информационный портал для профессионалов в области метрологии. [Электронный ресурс] URL: <https://www.promgeo.com/equipment/romer/hexagon-absolute-arm-7-axis/> - Дата обращения: 27.09.2020
7. Выбор 3D-сканера для реверс-инжиниринга / 3dtoday.ru: информационный портал для профессионалов в области 3-D сканирования и печати. [Электронный ресурс] URL: <https://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/vybor-3d-skanera-dlya-revers-inziniringa/> - Дата обращения: 26.09.2020.
8. Electric power systems KIT / P. Bannykh, A. Trembach, A. Kazantsev, O. Vozisova, S. Eroshenko // 2nd International Conference on Advances in Energy and Environmental Science, ICAEES 2014. Guangzhou, 21–22 June 2014. Advanced Materials Research. 1008–1009. P. 1166– 1170.

9. Калибровка щупов / renishaw.ru: информационный портал для профессионалов в области измерений, контроля перемещений, здравоохранения, спектроскопии и производства. [Электронный ресурс] URL: <https://www.renishaw.ru/ru/calibration-of-styli--6633/> - Дата обращения: 29.09.2020.
10. Введение в координатную метрологию/ Hexagonmi.com/ru: информационный портал в области обратного инжиниринга. [Электронный ресурс] URL: <https://www.hexagonmi.com/ru-ru/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology> - Дата обращения: 29.09.2020.

References

1. Tarakhovsky A.Yu. Geometric modeling and automation of the process of its study / A.Yu. Tarakhovsky // Education in the digital age: a collection of articles based on the materials of the International Scientific and Practical Conference of Teachers, Students, Postgraduates, Doctoral Students and Interested Persons, Nizhny Novgorod, December 10-11, 2019 - Nizhny Novgorod: Publishing House of N. Kozma Minin, 2019. -- S. 68-72.
2. Sasa D.A., Tarakhovsky A.Yu. Features of the manufacture of frame products for specialized rolling stock by creating computer modeling of the state of the object of the products // MODERN TECHNOLOGIES: PROBLEMS AND PROSPECTS // collection of articles of the All-Russian scientific-practical conference for graduate students, students and young scientists. Sevastopol, 2020 - Publishing house of FGAOUVO "SevGU", 2020 - pp. 210-213.
3. Vodin, DV Application of reverse engineering technology in mechanical engineering / DV Vodin. - Text: direct // Technical sciences: problems and prospects: materials of the IV Intern. scientific. conf. (St. Petersburg, July 2016). - St. Petersburg: Own publishing house, 2016. -- P. 67-69.
4. Reverse engineering / Caduser.ru: information portal for CAD professionals. [Electronic resource] URL: https://www.caduser.ru/press/articles/cm_87_10.html - Date of access: 09/26/2020.
5. 3D scanning and design services / Glavconstructor.ru information portal [Electronic resource] URL: <https://glavconstructor.ru/services/reverse-engineering/> - Date of access: 09/26/2020.
6. Equipment for reverse engineering / Promgeo.com: information portal for professionals in the field of metrology. [Electronic resource] URL: <https://www.promgeo.com/equipment/romer/hexagon-absolute-arm-7-axis/> - Date of access: 09/27/2020
7. Choosing a 3D scanner for reverse engineering / 3dtoday.ru: information portal for professionals in the field of 3-D scanning and printing. [Electronic resource] URL: <https://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/vybor-3d-skanera-dlya-revers-inziniringa/> - Date of access: 09/26/2020.
8. Electric power systems KIT / P. Bannykh, A. Trembach, A. Kazantsev, O. Vozisova, S. Eroshenko // 2nd International Conference on Advances in Energy and Environmental Science, ICAEES 2014. Guangzhou, 21-22 June 2014. Advanced Materials Research. 1008-1009. P. 1166-1170.
9. Probe Calibration / renishaw.ru: information portal for professionals in the field of measurement, motion control, healthcare, spectroscopy and manufacturing. [Electronic resource] URL: <https://www.renishaw.ru/ru/calibration-of-styli--6633/> - Date of access: 09/29/2020.
10. Introduction to coordinate metrology / Hexagonmi.com/ru: information portal in the field of reverse engineering. [Electronic resource] URL: <https://www.hexagonmi.com/ru-ru/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology> - Date of access: 09/29/2020.

УДК 621.914.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРОЦЕССА АБРАЗИВНОЙ РАЗРЕЗКИ

Е.А. Левченко¹, Н.И. Покинтелица¹, А.Г. Колесов¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Получены аналитические выражения, определяющие зависимости контактной температуры от технологических условий абразивной резки. При этом учтено влияние самой температуры на теплофизические характеристики и интенсивность напряжений в разрезаемом сечении реза заготовки; учтено трение связки круга о разрезаемую поверхность трубы. С учетом влияния температуры на теплофизические характеристики материала заготовки установлены и проанализированы аналитические выражения, определяющие температуру при движении сплошного и дискретного источников тепла. Установлено, что положение зерен в пространстве определяется приблизительно с заданной точностью; минимальные расстояния между соседними зёрнами принимаются равными между собой; температурные деформации зоны контакта, неровностей поверхности, режущих кромок пренебрежимо малы.

Ключевые слова: температура, поверхностный слой, связка круга, теплофизические характеристики, сплошной и дискретный источники тепла.

RESEARCH OF THERMOPHYSICAL PHENOMENA IN THE ABRASIVE CUTTING PROCESS

E.A. Levchenko¹, N.I. Pokintelitsa¹, A.G. Kolesov¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The analytical expressions for the temperature dependence of the contact from the technological and logical conditions of the abrasive cutting. This is considered the most influence of temperature on the thermal hatics and the intensity of the stresses in the cut section of the cut blanks; taken into account the friction circle bundles of the cut surface of the pipe. Taking into account the effect of temperature on the thermal characteristics of the material workpiece mounted and analyzed by analytical expressions for the temperature at the movement of the continuous and discrete heat sources. It is found that the position of the grains in the space is determined approximately with a predetermined accuracy; the minimum distance between adjacent grains are made equal to each other; thermal deformation of the contact zone, the surface roughness, cutting edges are negligible.

Keywords: temperature, surface layer, round ligament, thermal characteristics, continuous and discrete heat sources.

Введение

Абразивная резка трубных заготовок отрезными кругами сопровождается большим выделением теплоты, которая оказывает существенное влияние как на производительность процесса, так и на качество реза. Особенно важное значение это имеет при резке заготовок из труднообрабатываемых материалов, для которых этот способ обработки в ряде случаев является единственно возможным.

Как показал ряд исследований [1-15], контактная температура при резке труб

может достигать 400...800 С. Высокая температура разогревает металл в зоне резания и может изменять в значительной степени условия и режимы резки. Особенно важным является то, что с достижением определенной для каждой марки стали температуры её пределы прочности и упругости начинают резко снижаться, что позволяет повысить производительность резки за счет увеличения скорости подачи трубных заготовок. Однако из-за отсутствия научнообоснованного метода проектирования технологии абразивной

разрезки, особенно по выбору оптимальных режимов разрезки, широкое внедрение этого способа пока сдерживается.

Нагрев при абразивной разрезке протекает неравномерно. Наибольшее количество теплоты выделяется в месте контакта и распространяется путем теплопроводности в массу абразивного круга и трубы. Кроме того, наблюдаются потери теплоты путем конвекции и лучеиспускания. Общая картина явлений, усложняется еще и тем, что величины коэффициентов теплопроводности, конвекции и лучеиспускания изменяются в зависимости от температуры [3-6].

Трение абразивного круга и заготовки в процессе разрезания на большой скорости приводит к образованию высокой температуры в зоне резания. Максимальная температура концентрируется впереди режущего инструмента при внедрении его в разрезаемый материал [8-10]. Изменяя частоту вращения отрезного круга можно регулировать интенсивность нагрева зоны резания.

Результаты и обсуждение

Температуру, возникающую в любой точке поверхности отрезного круга и в любой момент времени, после того как круг совершил некоторое количество резов можно определить по формуле:

$$\Theta = \Theta_{\max} \varphi, \quad (1)$$

где Θ – расчетная температура, °C; $\Theta_{\max}$ – максимальная температура для данных условий разрезки, являющаяся размерной частью уравнения; φ – безразмерная функция, изменяющаяся от 0 до 1 и зависящая от координат рассматриваемой точки и теплофизических свойств изделия, времени наблюдения, длины хода и скорости движения источника тепла.

Максимальная температура определяется по формуле:

$$\Theta_{\max} = \frac{2q\sqrt{b_1}}{c\gamma\sqrt{\pi a S_y}}, \quad (2)$$

где q – интенсивность источника тепла; b_1 – ширина рабочей кромки круга; $c\gamma$ и a – соответственно удельная теплоемкость и температуропроводность материала заготовки; S_y – радиальная подача круга.

Выражение (2) можно использовать для расчета $\Theta_{\max}$ и Θ лишь в том случае, если контакт между кругом и заготовкой является сплошным, а не дискретным, как это имеет место на самом деле.

Действительный контакт абразивного круга с заготовкой представляет собой суммарную площадь отпечатков отдельных зерен, расположенных на площади S . Это приводит к необходимости ввести в расчетные температурные выражения поправку на дискретность контакта круга с заготовкой в виде коэффициента μ .

Абразивные зерна беспорядочно располагаются на рабочей поверхности отрезного круга. Однако для расчета коэффициента μ , учитывающего дискретность, принимаем в первом приближении, что зерна расположены в виде упорядоченных рядов.

Известно, что зерна даже одного номера зернистости имеют различные форму и размеры. Вместе с тем, Д. Б. Ваксер показал, что рассеивание основных их размеров близко к закону нормального распределения, а это обстоятельство позволяет обоснованно определять наиболее вероятные размеры зерен.

Часть зерен на изображена в виде черных кругов – это активные зерна, а часть – в виде белых – пассивные зерна. Это показывает, что половина общего числа зерен, расположенных на рабочей поверхности круга, является активными [4]. Поскольку скорость круга V_k достаточно велика (80 м/с) и, кроме того, она значительно превосходит радиальную подачу S_y то полагаем, что активные зерна создают в направлении вектора V_k сплошные концентричные полосы (рис. 1), каждая из которых имеет ширину Δ , равную среднему размеру зерна.

Пусть на 1 см^2 рабочей поверхности круга расположено n зерен, тогда на контактной площадке будет nBb_1 зерен. Найдем число полос N_1 шириной Δ , расположенных на длине источника тепла (ширине кромки круга) b_1 ,

$$N_1 = \frac{b}{\Delta + f}, \quad (3)$$

где f – промежуток между зернами.

Число участков N_2 , расположенных вдоль толщины стенки заготовки B , определяется так:

$$N_2 = \frac{B}{\Delta + f}. \quad (4)$$

Очевидно, произведение

$$nBb_1 = N_1 N_2 = \frac{Bb_1}{(\Delta + f)^2},$$

откуда

$$\Delta + f = \frac{\sqrt{n}}{n}, \quad (5)$$

и

$$N_1 = b_1 \sqrt{n}. \quad (6)$$

В (табл. 1) приведены взятые из различных литературных источников данные о количестве абразивных зерен n на 1 см^2 рабочей поверхности отрезного круга, средние значения n (эти значения использовались в наших выкладках), а также величины N_1 и расстояния между активными зернами l , рассчитанные по формуле (7) и по эмпирической формуле Е.Н. Маслова [4].

Из (рис. 1) с учетом (5) получим:

$$l = 2(\Delta + f) = \frac{2\sqrt{n}}{n} = \frac{2}{\sqrt{n}}. \quad (7)$$

Сравнение расстояний l , рассчитанных по (7) и по эмпирической зависимости Е. Н. Маслова [8], показывает, что их значения достаточно близки. Это дает основание предполагать, что удовлетворительно моделирует расположение абразивных зерен на рабочей поверхности абразивного круга.

Если источник сплошной, то при его движении происходит монотонное нарастание температуры до того момента, пока он полностью не пройдет над рассматриваемой точкой заготовки. В этот момент температура достигает максимума, а потом начинает падать по экспоненциальному закону.

При движении дискретного источника тепла нарастание температуры носит пилообразный характер (если промежуток f по величине таков, что за время $\tau = \frac{f}{S_y}$

рассматриваемая точка заготовки успеет остыть до исходной температуры, то общего нарастания Θ не будет).

Произведем сравнение максимальных температур $\Theta_{1\max}$ и $\Theta_{2\max}$ возникающих в точке О при движении соответственно сплошного и дискретного источников тепла.

Таблица 1. Расчетные данные

Зернистость круга (ГОСТ 3647-59)	Количество зерен n на 1 см ² рабочей боковой поверхности отрезного круга	Среднее значение n	Количество зерен при $b_1 = 1$ см	Расстояние между активными зернами l , мм	
				Расчетные данные по выражению (7)	по формуле Е.Н. Маслова
40	360 ¹	410	20	0,99	1,25
	250 ²				
	740 ³				
	280 ⁴				
	530 ⁵				
	368 ⁶				
	340 ⁷				
30	890 ¹	870	30	0,68	0,87
	630 ²				
	1550 ³				
	530 ⁴				
	990 ⁵				
	910 ⁶				
	600 ⁷				
24	1190 ¹	1560	40	0,51	0,56
	1720 ²				
	1930 ³				
	1100 ⁴				
	2340 ⁵				
	110 ⁷				
1 по данным П.Е. Дьяченко. 2 по данным Н.Н. Волского. 3 по данным Е.Н. Маслова. 4 по данным Л.А. Глейзера. 5 по данным Г.М. Ипполитова. 6 по данным С.А. Попова. 7 по данным С.Г. Редько					

Интенсивность тепловых потоков, поступающих в заготовку в обоих случаях, можно рассчитать по следующим формулам:

$$q_1 = \frac{P_z \cdot V_k \cdot \omega_1}{I \cdot B \cdot b_1}; \quad (8)$$

$$q_2 = \frac{P_z \cdot V_k \cdot \omega_2}{I \cdot B \cdot \Delta N_1}, \quad (9)$$

где P_z – касательная составляющая силы резания; I – тепловой эквивалент работы; ω_1 и ω_2 – доли от общего количества тепла, переходящего в заготовку при движении сплошного и дискретного источников тепла соответственно.

Значения ω_1 и ω_2 рассчитываются следующим образом [2]:

$$\omega_1 = \frac{1}{1 + R \sqrt{\frac{V_k \cdot b}{S_y \cdot B}}};$$

$$\omega_2 = \frac{1}{1 + R \sqrt{\frac{V_k \cdot \Delta}{S_y \cdot B}}},$$

где $R = \frac{k_\omega c_1 \gamma_1 \sqrt{a_1}}{c \gamma \sqrt{a}}$ ($k_\omega = 2$ поправочный коэффициент).

Температуры $\Theta_{1\max}$ и $\Theta_{2\max}$ определяем по (2). Подставив вместо q значения q_1 и q_2 получим:

$$\Theta_{1\max} = \frac{2q_1\sqrt{b_1}}{c\gamma\sqrt{\pi a S_y}} = \frac{2P_z V_k \sqrt{b_1 \cdot \omega_1}}{c\gamma\sqrt{\pi a S_y I \cdot B \cdot b_1}} = \frac{k\omega_1}{\sqrt{b_1}} \quad (10)$$

$$\Theta_{2\max} = \frac{2q_2\sqrt{\Delta}}{c\gamma\sqrt{\pi a S_y}} \sum_{i=1}^{N_1} (\sqrt{\xi_i} - \sqrt{\xi_i - 1}) = \frac{2P_z V_k \sqrt{\Delta \cdot \omega_2}}{c\gamma\sqrt{\pi a S_y I \cdot B \cdot \Delta N_1}} \sum_{i=1}^{N_1} (\sqrt{\xi_i} - \sqrt{\xi_i - 1}) = \frac{k\omega_2}{N_1\sqrt{\Delta}} \sum_{i=1}^{N_1} (\sqrt{\xi_i} - \sqrt{\xi_i - 1}). \quad (11)$$

где $k = \frac{2P_z V_k}{c\gamma\sqrt{\pi a S_y I \cdot B}}$.

В уравнении (11) выражение, стоящее под знаком суммы, учитывает аккумуляцию тепла в заготовке [1], являющегося результатом движения каждого из элементарных источников шириной Δ . При этом ξ является безразмерным критерием, определяемым отношением по формуле:

$$\xi = \frac{S_y t}{b_1},$$

где t – время движения круга на величину t_ϕ (рис. 2).

Так как $S_y t = b_1$, то $\xi = \frac{b_1}{\Delta}$. Пользуясь (8), представим величину b_1 уравнением:

$$b_1 = N_1(\Delta + f).$$

Тогда, полагая, что $f / \Delta = \delta$, будем иметь:

$$\xi_1 = \frac{N_1(\Delta + f)}{\Delta} = N_1(1 + \delta);$$

$$\xi_2 = (N_1 - 1)(1 + \delta);$$

$$\xi_3 = (N_1 - 2)(1 + \delta);$$

$$\xi_i = (N_1 - i + 1)(1 + \delta).$$

Из табл. 1 видно, что $N_1 = 20 \div 40$, это позволяет упростить последнее выражение:

$$\xi_i = (N_1 - i)(1 + \delta) \quad (12)$$

Подставив выражение (12) в (11), получим:

$$\Theta_{2\max} = \frac{k\omega_2}{N_1\sqrt{\Delta}} \sum_{i=1}^{N_1} \left[\sqrt{(N_1 - i)(1 + \delta)} - \sqrt{(N_1 - i)(1 + \delta) - 1} \right]. \quad (13)$$

Определим коэффициент:

$$\mu = \frac{\Theta_{2\max}}{\Theta_{1\max}} = \frac{\omega_2}{\omega_1 N_1} \sqrt{\frac{b}{\Delta}} \times \sum_{i=1}^{N_1} \left[\sqrt{(N_1 - i)(1 + \delta)} - \sqrt{(N_1 - i)(1 + \delta) - 1} \right].$$

Так как $b / \Delta = N_1(1 + \delta)$, то окончательное выражение для расчета μ имеет следующий вид:

$$\mu = \frac{\omega_2 \sqrt{1 + \delta}}{\omega_1 \sqrt{N_1}} \times \sum_{i=1}^{N_1} \left[\sqrt{(N_1 - i)(1 + \delta)} - \sqrt{(N_1 - i)(1 + \delta) - 1} \right]$$

Таким образом, расчетная температурная зависимость, согласно уравнению (1), может быть представлена так:

$$\Theta = \frac{2q\mu\sqrt{b_1}}{c\gamma\sqrt{\pi a S_y}} \varphi. \quad (14)$$

С увеличением R , отношения скорости и радиальной подачи круга и с уменьшением зернистости круга значения μ возрастают.

Выводы

Процессы формирования температурного поля в зоне контакта инструмента и заготовки достаточно сложны. Каждое зерно, пробегающее со скоростью круга дугу контакта, возбуждает в металле высокотемпературные вспышки, наложение которых друг на друга образует температурный фон, который со временем

стабилизируется, образуя постоянную составляющую температурного поля. Для обеспечения заданного качества поверхностного слоя трубных заготовок размер площадок износа абразивных зерен не должен превышать величины, при которой температура поверхностного слоя становится равной предельно допустимой.

Список литературы

1. Грабченко А.И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: учебн. пособие / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – 364 с.
2. Калинин Е. П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента: дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.03.01 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / Е.П. Калинин. – Рыбинск, 2006. – 414 с.
3. Козлов А.М. Формирование микрорельефа при обработке абразивным инструментом / А.М. Козлов, В.В. Ефремов // Известия вузов: сер. Машиностроение. – 2004. – №1. – С. 59–64.
4. Левченко Е.А. Анализ закономерностей удаления металла боковыми сторонами круга при абразивной разрезке труб / Е.А. Левченко, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2011. – Вип. 118. – С. 57 – 61.
5. Новоселов Ю.К. Экспериментальное исследование состояния поверхностного слоя трубных заготовок при абразивной разрезке / Ю.К. Новоселов, Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – Вип. 30. – С.392 – 397.
6. Левченко Е.А. Теоретическое исследование особенностей работы боковых поверхностей отрезного круга при абразивной разрезке труб / Е.А. Левченко // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – Вип. 107. – С. 114 – 117.
7. Новоселов Ю.К. Аналитический расчет элементов конструкции боковых поверхностей отрезных кругов / Ю.К. Новоселов, Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – Вип. 28. – С.27–31.
8. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
9. Никифоров И.П. Стохастическая модель процесса шлифования / И.П. Никифоров // Известия вузов: сер. Машиностроение. – 2003. – №6. – С. 64–72.
10. Основы теории тепловых явлений при шлифовании деталей машин: учеб. пособие / А.В. Якимов [и др.]. – О.: ОГПУ, 1997. – 272 с.
11. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
12. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов // – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
13. Суров С.П. Тепловые явления при разрезании абразивными кругами (дисками). / С.П. Суров// – Тр. УралВНИИАШ. – Челябинск, 1968. – Вып. 1. – С 164 – 169.
14. Якимов А.В. Основы тепловых явлений при шлифовании деталей машин / А.В. Якимов [и др.]. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 272 с.
15. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – К.: Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.

References

1. Grabchenko A.I. 3D modelirovaniealmazno-abrazivnykh instrumentov i protsessov shlifovaniia: uchebn. posobie / A.I. Grabchenko, V.L. Dobroskok, V.A. Fedorovich. – Khar'kov: NTU "KhPI", 2006. – 364 s.
2. Kalinin E. P. Teoriia i praktika upravleniia proizvoditel'nost'iu abrazivnoi obrabotki s uchetom zatupleniia instrumenta: dis. na so-skaniie nauch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spets. 05.03.01 «Tekhnologiiia i oborudovanie mekha-nicheskoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki» / E.P. Kalinin. – Rybinsk, 2006. – 414 s.
3. Kozlov A.M. Formirovanie mikrorel'efa pri obrabotke abrazivnym instrumentom / A.M. Kozlov, V.V. Efremov // Izvestiia vuzov: ser. Mashinostroenie. – 2004. – №1. – S. 59–64.
4. Levchenko E.A. Analiz zakonomernostei udaleniia metalla bokovymi storonami kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko, Iu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2011. – Vip. 118. – C. 57 – 61.
5. Novoselov Iu.K. Eksperimental'noe issledo-vanie sostoianiiia poverkhnostnogo sloia trub-nykh zagotovok pri abrazivnoi razrezke / Iu.K.

- Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Kramators'k: DDMA, 2012. – Vip. 30. – S.392 – 397.
6. Levchenko E.A. Teoreticheskoe issledovanie osobennosti raboty bokovykh poverkhnosti otreznogo kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2010. – Vip. 107. – C. 114 – 117.
7. Novoselov Iu.K. Analiticheskii raschet elementov konstruksii bokovykh poverkhnosti otreznykh krugov / Iu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Kramators'k: DDMA, 2011. – Vip. 28. – S.27–31.
8. Maslov E.N. Teoriia shlifovaniia materialov / E.N. Maslov. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 320 s.
9. Nikiforov I.P. Stokhasticheskaia model' protsessa shlifovaniia / I.P. Nikiforov // Izve-stiia vuzov: ser. Mashinostroenie. – 2003. – №6. – S. 64–72.
10. Osnovy teorii teplovykh iavlenii pri shlifovanii detalei mashin: ucheb. posobie / A.V. Iakimov [i dr.]. – O.: OGPU, 1997. – 272 s.
11. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnosti pri abrazivnoi obrabotke / Iu.K. Novoselov. – Sevastopol: Izd-vo SenNTU, 2012. – 304 s.
12. Sipailov V.A. Teplovy protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti / V.A. Sipailov // – M.: Mashinostroenie, 1978. – 167 s.
13. Surov S.P. Teplovy iavleniia pri razrezanii abrazivnymi krugami (diskami). / S.P. Su-rov// – Tr. UralVNIIASh. – Cheliabinsk, 1968. – Vyp. 1. – S 164 – 169.
14. Iakimov A.V. Osnovy teplovykh iavlenii pri shlifovanii detalei mashin / A.V. Iakimov [i dr.]. – Odessa: OGPU, 1997. – 272 s.
15. Iakimov A.V. Teplofizika mekhanicheskoi obrabotki / A.V. Iakimov, P.T. Slobodianik, A.V. Usov. – K.: Odessa: Lybid, 1991. – 240 s.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №3(19) 2020

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.
