

УДК 621.757

В.М. Липка, магистр,**Ю.Л. Рапацкий, доцент, канд. техн. наук***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: u.l.rapatskiy@sevntu.com.ua***АНАЛИЗ СТОЙКОСТИ РЕЗЬБОНАКАТНОГО ИНСТРУМЕНТА В УСЛОВИЯХ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА И ПУТИ ЕЁ
ПОВЫШЕНИЯ**

В статье изложены результаты экспериментальных исследований и анализа факторов, определяющих стойкость резьбонакатного инструмента в условиях автоматизированного массового производства. Предложен рациональный вариант технологии изготовления резьбонакатного инструмента повышенной стойкости.

Ключевые слова: *резьбонакатывание, резьбонакатной инструмент, стойкость, остаточный аустенит, химико-термическая обработка*

Получение резьб накатыванием является в настоящее время одним из наиболее производительных и эффективных методов изготовления резьбовых деталей, особенно в условиях автоматизированного массового производства. Вместе с тем экономическая эффективность резьбонакатывания существенно зависит от стойкости накатного инструмента, но не для всех факторов, влияющих на нее, существуют применимые на практике методики количественной оценки. В литературе [1,2] и др. приводятся многочисленные данные о стойкости резьбонакатных инструментов, рассмотрены методы её повышения, эффективность которых нуждается в экспериментальной проверке.

Целью исследования является комплексная оценка влияния различных факторов на стойкость резьбонакатного инструмента в условиях автоматизированного массового производства, а также экспериментальная проверка эффективности методов повышения стойкости с целью выбора среди них наиболее рационального. При анализе процесса резьбонакатывания к наиболее существенным факторам, большинство из которых имеет стохастический характер, можно отнести: точность и жесткость резьбонакатного оборудования; качество наладки инструмента и оснастки; точность геометрических параметров заготовок (размер фаски, диаметр под накатку, правильность формы); твердость инструмента и др. Отдельные факторы могут условно считаться постоянными, например скорость накатывания, которую, как правило, назначают возможно более высокой в рекомендуемом диапазоне. На рисунке 1 приведены изображены накатные ролики, критический износ которых наступил в процессе эксплуатации на ХРП «АвтоЗАЗ-Мотор» (г. Мелитополь).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1 – Разрушение резьбонакатных роликов

На этом же рисунке внизу справа показан также ролик для накатывания масляных канавок на детали «Ось спутников», условия эксплуатации которого и возможные причины быстрого износа имеют некоторые особенности, однако в целом близки к аналогичным характеристикам резбонакатного инструмента.

Существуют также переменные факторы, количественная оценка которых позволяет определить ориентировочную стойкость инструмента и предпринять необходимые меры по ее увеличению. Опыт эксплуатации резбонакатного инструмента в условиях массового автоматизированного производства на ХРП «АвтоЗАЗ-Мотор» и других предприятиях [1,2] дает возможность выделить следующие общие переменные факторы: механические свойства материала заготовок (предел прочности, твердость); материал инструмента и способ образования резьбы на нём; размер (диаметр, шаг) и точность накатываемой резьбы; возможность применения различных способов повышения стойкости. Кроме того, для резбонакатного инструмента каждого вида есть и свои специфические переменные факторы, которые в настоящее время ещё не полностью исследованы.

Стойкость инструмента обычно измеряют в часах, но для каждого отдельного комплекта резбонакатного инструмента существенно более информативным параметром является количество заготовок, на которых может быть накатана резьба при выполнении всех установленных требований к качеству деталей.

Ориентировочную стойкость T_P (тыс. заготовок) роликов для двухроликовых станков, работающих с радиальной подачей, можно определить по формуле

$$T_P = T_T K_M K_C K_\Phi K_T K_D, \quad (1)$$

где T_T – базовая стойкость инструмента; K_M – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от предела прочности и твердости материала заготовки; K_C – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от марки инструментальной стали; K_Φ – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от способа формообразования резьбового профиля на нём; K_T – коэффициент, характеризующий изменение стойкости в зависимости от размера обрабатываемой резьбы; K_D – коэффициент, учитывающий изменение стойкости роликов в зависимости от их диаметра.

В таблице 1 приведены значения коэффициента K_M , характеризующего изменение стойкости накатного инструмента из стали Х12М в зависимости от предела прочности и твердости материала заготовки [1]. Ряд значений коэффициента K_M были выборочно экспериментально проверены и с достаточной точностью подтверждены в условиях ХРП «АвтоЗАЗ-Мотор».

Таблица 1 – Коэффициент K_M , характеризующий изменение стойкости накатного инструмента из стали Х12М в зависимости от предела прочности и твердости материала заготовки

Механические свойства материала заготовки		K_M	Механические свойства материала заготовки		K_M
НВ	σ_B , МПа		НВ	σ_B , МПа	
103	343	9,0	207	687	1,0
111	363	6,6	229	765	0,83
121	402	5,4	241	798	0,62
131	432	4,3	255	853	0,55
143	481	3,6	269	900	0,42
156	520	3,0	285	951	0,27
170	569	2,0	321	1069	0,10
187	627	1,5	363	1206	0,05

Накатывание резьбы характеризуется высоким давлением на накатной инструмент, в связи с чем материалы, из которых он изготовлен, должны обладать высокими твердостью, прочностью, износостойкостью, достаточной вязкостью и повышенной теплостойкостью. Эти свойства количественно выражает обобщенный коэффициент K_C , характеризующий изменение стойкости в зависимости от марки инструментальной стали. Экспериментами, проведенными на ХРП «АвтоЗАЗ-Мотор», установлено, что наибольшей стойкостью обладает резбонакатной инструмент из стали Х12М, что соответствует данным [1,2]. Возможно также применение сталей других марок, но, как показывает опыт длительной эксплуатации, практически все они уступают по стойкости стали Х12М. Если стойкость инструмента из стали Х12М принять за единицу, то значение коэффициента K_C инструмента из стали

других марок будет следующими: для Х6ВФ – 0,5; для Х12Ф1 – 0,8; для 6Х4М2ФС – 0,8. Стойкость стали 6Х6ВЗМФС: при твердости заготовки $HV \leq 225$ $K_C = 1,3...1,5$, а при твердости $HV \geq 285$ $K_C = 2$. Однако эта сталь имеет ограниченное применение вследствие плохой шлифуемости и высокой стоимости. Вместе с тем зависимость между стоимостью стали и стойкостью резбонакатного инструмента, изготовленного из неё, как показали исследования, проведенные на ХРП «АвтоЗАЗ-Мотор», носит нелинейный характер, что позволяет ставить и решать задачи выбора оптимального варианта для условий конкретного производства.

На стойкость инструмента влияет также способ формообразования резбового профиля на нем, что характеризует коэффициент K_ϕ . Опыт эксплуатации показал, что большей стойкостью и надежностью обладает инструмент со шлифованной резьбой благодаря высокой геометрической точности профиля. Если его стойкость принять за единицу, то относительная стойкость инструмента с накатанным профилем $K_\phi = 0,7$, а инструмент с фрезерованным профилем $K_\phi = 0,5$. Работы по определению влияния на стойкость инструмента способа формирования резьбы проводились в г. Москве на ЗИЛе и на Мелитопольском моторном заводе [1]. На основе имеющегося опыта на роликах было установлено, что стойкость шлифованного и накатного инструментов, при прочих равных условиях, имеет соотношения от 1:0,75 до 1:0,85. Стойкость шлифованного и фрезерованного инструментов имеет соотношение от 1:0,5 до 1:0,7. В среднем на производстве принято следующее соотношение стойкостей шлифованного, накатанного и фрезерованного инструментов: 1:0,8:0,6. Эти данные позволили считать, что с точки зрения стойкости шлифование является оптимальной механической операцией формирования резьбы на резбонакатном инструменте. Этот инструмент обладает не только более высокой стойкостью, но и надежностью в работе. Поэтому на ЗИЛе и на ХРП «Инструментальщик» (г. Мелитополь) почти у всех резбонакатных инструментов производится шлифование резьбы. Накатывание и фрезерование резьб, несмотря на их большую производительность в сравнении с шлифованием, применяются лишь для неточных инструментов или инструментов, для которых не удастся осуществить операцию резьбошлифования из-за ее сложности. Они могут также использоваться как предварительные операции при изготовлении резьб с крупными шагами.

На стойкость инструмента существенное влияние оказывают геометрические размеры обрабатываемой резьбы: диаметр, шаг, а также требования к точности накатываемой резьбы. В таблице 2 приведены экспериментально установленные значения коэффициента K_T , позволяющего учесть точность накатываемой резьбы.

Таблица 2 – Значения коэффициента K_T в зависимости от точности накатываемой резьбы

Поле допуска резьбы	6g; 8g	4h; 4h6h	2m	3n; 3p
K_T	1,0	0,65 – 0,70	0,65	0,75

Увеличение диаметра и шага накатываемой резьбы приводит к снижению стойкости накатного инструмента. Так, увеличение диаметра на каждые 2мм при одном и том же шаге снижает стойкость инструмента на 10–15 %. В таблице 3 показана зависимость относительной стойкости инструмента при одном и том же его диаметре от шага накатываемой резьбы (за единицу принята стойкость при $P=1,5$ мм)

Таблица 3 – Зависимость стойкости инструмента от шага резьбы при неизменном диаметре

P , мм	0,35	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0
Относительная стойкость	1,65	1,55	1,45	1,25	1,05	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5
	—	—	—	—	—		—	—	—	—
	1,70	1,60	1,50	1,30	1,10		0,85	0,75	0,65	0,55

Совместное влияние диаметра и шага накатываемой резьбы на стойкость накатного инструмента различных видов учитывает базовая стойкость T_T . В таблице 4 приведены экспериментально подтвержденные данные [1] по базовой стойкости роликов для двухроликовых накатных станков, работающих с радиальной подачей.

Приведенные в таблице 4 значения стойкости соответствуют следующим условиям: твердость накатываемых заготовок 207HV; материал роликов – сталь Х12М твердость 59–62 HRC₂ и с баллом карбидной неоднородности не более 5; резьба на роликах шлифованная; ролики односторонние; поле допуска накатываемой резьбы – 6g; охлаждение – масло индустриальное; диаметр роликов – 150 мм.

Таблица 4 – Базовая стойкость T_T роликов для двухроликовых накатных станков, работающих с радиальной подачей

Номинальный диаметр резцы, мм	Наработка до отказа T_T , тыс. заготовок, при шаге резцы P , мм						
	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0
6	130	—	—	—	—	—	—
8	115	90	—	—	—	—	—
10	100	82	75	—	—	—	—
12	87	74	67	53	—	—	—
14	—	65	60	—	42	—	—
16	—	—	54	—	38	—	—
18	—	—	48	—	34	30	—
20	—	—	44	—	30	27	—
22	—	—	40	—	28	25	—
24	—	—	36	—	25	—	20

В таблице 5 приведены значения коэффициента K_D , позволяющего установить взаимосвязь между стойкостью роликов и их диаметром.

Таблица 5 – Коэффициент K_D , учитывающий изменение стойкости роликов в зависимости от их диаметра

d_p , мм	100	150	200	250
K_D	0,7	1,0	1,3	1,6

Стойкость резбонакатного инструмента может быть значительно повышена путем конструктивных усовершенствований, применения износостойких покрытий, а также химико-термической и упрочняющей обработки различных видов.

Одним из способов увеличения стойкости является увеличение числа рабочих сторон до двух для роликов. Однако применение этого способа ограничено длиной накатываемой резцы и возможностями резбонакатного оборудования.

Применением струйной абразивной обработки также достигается повышение стойкости инструмента. Эта обработка является упрочняющей и обеспечивает снятие остаточных напряжений, а также частичное удаление дефектного слоя (микротрещины, направленные следы обработки, обезуглероженный слой). Такая обработка после шлифования резцы на инструменте создает оптимальную микрогеометрию поверхности, благодаря чему лучше удерживается смазочная жидкость. Обработка осуществляется абразивной суспензией, выбрасываемой с помощью сжатого воздуха на обрабатываемую поверхность, рабочая смесь состоит из карбида кремния, карбида бора, электрокорунда и антикоррозионных добавок.

Наибольшая стойкость инструмента достигается усовершенствованием технологического процесса его изготовления, заключающимся в специальной термообработке, позволяющей получить повышенное содержание остаточного аустенита, шлифовании поверхности резцы и других поверхностей элборовыми кругами, а также низкотемпературном отпуске для снятия остаточных напряжений. Металловедческие исследования в лаборатории ХРП «АвтоЗАЗ-Мотор» показали, что у инструментов, изготовленных по обычной технологии, карбиды расположены слоями – в виде параллельных линий, а по усовершенствованной – они расположены равномерно по всему объему. Такая структура достигается многократной проковкой или электрошлаковым переплавом при последующей специальной термообработке, за счет которой может обеспечиваться необходимое содержание остаточного аустенита: до 20...30 % (вместо обычных 5...10 %, при этом должна быть достигнута твердость на 2-3 единицы HRC выше обычной, т.е. HRC 61...62.) Такая технология изготовления рекомендуется для инструмента из стали X12M, X12Ф1. Стойкость при этом, в зависимости от режима эксплуатации, может быть повышена в 2-3 раза, так как аустенит увеличивает пластичность, что при высокой поверхностной твердости уменьшает сколы и выкрашивание резцовых ниток. Кроме того, повышенное содержание аустенита способствует самоупрочнению инструмента в процессе накатывания резцы.

Ниже в таблице 6 даны коэффициенты повышения стойкости от применения различных способов увеличения работоспособности резбонакатного инструмента. Возможно применение одновременно нескольких способов.

Таблица 6 – Коэффициенты повышения стойкости от применения различных способов увеличения работоспособности резбонакатного инструмента

Способ повышения стойкости	Коэффициент повышения стойкости
Струйная абразивная обработка	1,2–1,3
Увеличение числа рабочих сторон	2,0
Повышение содержания остаточного аустенита до 20–30%	2,5–3,0

Весьма ощутимые результаты по стойкости может дать применение комплекса конструкторских и технологических мероприятий. Так, на Рязанском заводе автомобильных агрегатов ПО «ЗиЛ» при двухроликовом накатывании резьбы М30×1,5-6g на заготовке из стали 40Х стойкость инструмента удалось повысить в 6...8 раз вследствие увеличения диаметра роликов с 150 до 180 мм и ширины до 60 мм (вместо 50), что позволило сделать их двусторонними, изготовления роликов из стали Х12М и применения струйной абразивной обработки [2].

Применение стальных заготовок, полученных электрошлаковым переплавом, рафинирующим металл от нежелательных примесей и улучшающим его микроструктуру, делая ее более равномерной по всему объему, позволяет повысить стойкость инструмента в 1,5-2 раза. Карбохромирование и борирование позволяют повысить стойкость инструмента в 3-4 раза вследствие наличия твердого износостойкого диффузионного покрытия в поверхностном слое. Однако область их применения ограничена из-за деформаций, происходящих при высоких температурах (1000°С), характерных для этих процессов. Наилучшие результаты показал инструмент, изготовленный из стали Х12М по описанной выше технологии. Дополнительная термообработка стандартного резбонакатного инструмента на повышенное содержание остаточного аустенита дала примерно такие же результаты, как и карбохромирование: стойкость инструмента повысилась в 3-4 раза, но при этом отклонения у инструмента превышали чертежный допуск в 1,5...2,5 раза и были причиной отхода его в брак. В связи с этим в последующих экспериментах резьба шлифовалась после термообработки многониточными алмазными (эльборовыми) кругами, которые обеспечивали получение качественного резбонакатного инструмента – без наличия микротрещин и прижогов, без снижения содержания аустенита.

Предлагаемая на основании экспериментальных исследований и рекомендаций [1, 2] рациональная технология изготовления резбонакатного инструмента повышенной стойкости состоит из следующих операций: 1) тщательная проковка заготовок с получением 3-4-го балла карбидной неоднородности; 2) механическая обработка заготовок под шлифование; 3) термообработка на повышенное (до 20...30 %) содержание аустенита и твердость HRC 61...62; 4) шлифование всех поверхностей, в том числе резьбы, эльборовыми кругами; 5) низкотемпературный отпуск для создания на поверхности инструмента благоприятных остаточных напряжений; 6) струйная абразивная обработка.

На работоспособность резбонакатного инструмента большое влияние оказывает также точность взаимного расположения его рабочей поверхности к опорному торцу и погрешности шага между его резьбообразующими нитками. Характер изменения деформаций δ по взаимному расположению поверхностей и шагу инструмента в зависимости от метода дополнительной обработки (карбохромирование, борирование и термообработка на остаточный аустенит) и жесткости инструмента $K_{ж}$ показан на рисунке 2.

Анализ деформаций показывает, что наибольшее значение они принимают при карбохромировании и наименьшее – при термообработке на повышенное содержание аустенита. Погрешность шага (мм) при этих видах дополнительной обработки для инструмента с жесткостью $K_{ж} = 3...7$: при карбохромировании 0,058...0,038 мм; при борировании 0,038...0,035; при термообработке на аустенит 0,027...0,024. Отклонения от перпендикулярности (мм) рабочей части по отношению к опорному торцу; при карбохромировании 0,068...0,05 мм; при борировании 0,049...0,048; при термообработке на аустенит 0,035...0,032. Таким образом, деформации при борировании до 1,5 раз, а при термообработке на аустенит до 2 раз меньше, чем при карбохромировании. Данное исследование показало, что дополнительная термообработка всегда вносит в технологический процесс нестабильность.

Стойкость также зависит от жесткости инструмента $K_{ж}$, представляющим собой следующее отношение

$$K_{ж} = S/L, \quad (2)$$

где S – площадь поперечного сечения инструмента; L – длина инструмента. Расчетная схема резбонакатного инструмента для определения жесткости представлены на рисунке 3.

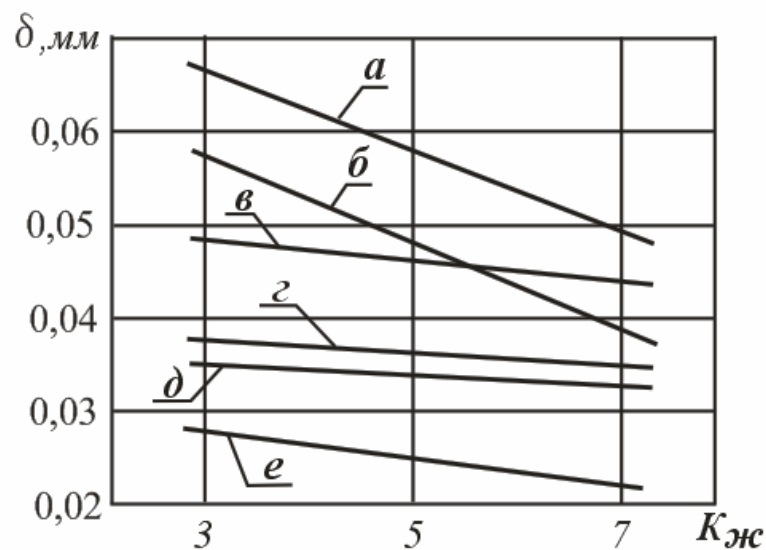


Рисунок 2 – Изменение отклонений резьбонакатного инструмента в зависимости от способа дополнительной обработки и его жесткости: а – отклонение от перпендикулярности при карбохромировании; б – погрешность шага при карбохромировании; в – отклонение от неперпендикулярности при борировании; г – погрешность шага при борировании; д – отклонение от перпендикулярности при термообработке; е – погрешность шага при термообработке

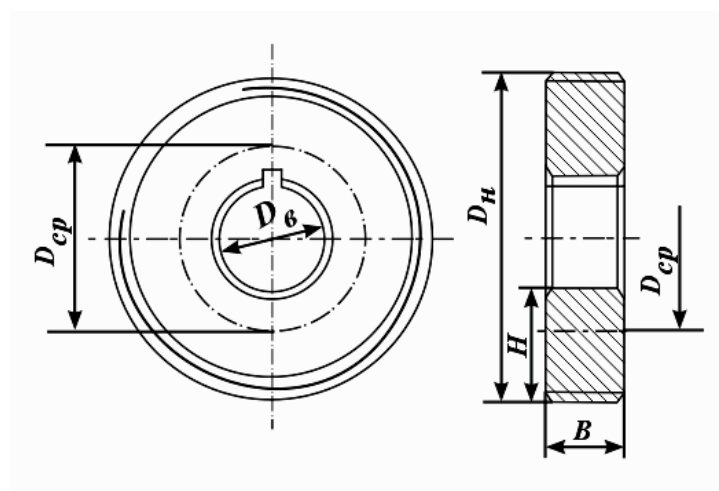


Рисунок 3 – Расчетная схема резьбонакатного ролика

Значение этого коэффициента подчитывается по формуле:

$$K_{жс} = \frac{HB}{L} = \frac{HB}{\pi D_{ср}} = \frac{(D_H - D_B)B}{(D_H + D_B)\pi}, \quad (3)$$

где H – толщина ролика; B – ширина ролика; D_H – наружный диаметр ролика; D_B – внутренний диаметр ролика; $D_{ср}$ – средний диаметр ролика. По данным ЗИЛа, значение этого коэффициента для накатывания двумя роликами соответствует 3,5...14.

На основании анализа данных, приведенных в [1, 2] и результатов экспериментальных исследований на рисунке 4 представлена обобщенная классификация способов и факторов, влияющих на стойкость резьбообрабатывающего инструмента.



Рисунок 4 – Классификация различных способов увеличения срока службы резбонакатного инструмента

Экспериментальное сравнение технологических процессов изготовления резьбовых деталей в условиях Производства метизов на Мелитопольском моторном заводе, позволило провести анализ причин разрушения резбонакатных роликов при двух разных способах накатки резьбы. Первый способ соответствует следующим условиям: станок резбонакатной UPW–12,5×70; автоматическая загрузка заготовок; ролики затылованные, тангенциальная подача осуществляется за счёт формы инструмента. Второй способ отличался следующими условиями: станок – профиленакатной полуавтомат GWR-80; ручная установка деталей; накатывание двумя цилиндрическими роликами с параллельными осями и радиальной подачей инструмента. Остальные условия были одинаковы для двух способов: материал накатываемой резьбы – ст.35, 40X, 35X; диаметр обрабатываемой резьбы – 8...12 мм; материал роликов – сталь X12M твердостью 58...61 HRCэ, с баллом карбидной неоднородности не более 5; резьба на роликах шлифованная; ролики односторонние; поле допуска накатываемой резьбы – 6g; охлаждение – масло индустриальное. Сравнительный анализ результатов показал, что способ накатывания с затылованными роликами и автоматизированной загрузкой заготовок обладает более высокой стабильностью технологического процесса. Ролики, работающие с радиальной подачей и ручной установкой заготовки, показали более низкую стойкость инструмента порядка 25...30 тыс. деталей, а затылованные ролики, работающие в условиях автоматизированной установки детали и тангенциальной подачи инструмента показали стойкость порядка 70...150 тыс. деталей. Все использованные в эксперименте ролики производят на ХРП «Инструментальщик» (г. Мелитополь) по одинаковой маршрутной технологии. Следует отметить, что при накатывании цилиндрическими роликами с параллельными осями происходят более сильные ударные нагрузки, а при обработке затылованными роликами стойкость роликов выше, так как при этом в процессе формирования резьбы принимает участие загрузочная, заборная и калибрующая часть. Важно также отметить, что при ручной загрузке высока вероятность возникновения неправильного положения заготовки, что приводит к разрушению резьбовых ниток роликов, а автоматизированная подача в рабочую зону станка практически исключает возможные погрешности базирования. Кроме того, возможные несоответствия требованиям технологической дисциплины непосредственно влияют на стойкость инструмента, а также на стабильность техпроцесса обработки заготовок.

По результатам проведенных исследований могут быть сделаны следующие **выводы**.

На стойкость резбонакатных инструментов оказывает существенное влияние ряд переменных и постоянных факторов, возможность управляющего воздействия на которые ограничена как техническими возможностями оборудования, так и особенностями технологического процесса резбонакатывания.

Проведенная экспериментальная проверка значений параметров, характеризующих процесс резьбонакатывания, позволяет использовать полученные результаты для поиска рациональных технологических решений применительно к различным условиям производства.

Предлагаемая рациональная технология изготовления резьбонакатного инструмента позволяет без заметного увеличения себестоимости существенно, более, чем в 2 раза, продлить срок его службы.

Направление дальнейших исследований связано с постановкой и решением задач выбора оптимальных соотношений между конструктивными параметрами резьбонакатного инструмента, его стойкостью и технологическими режимами накатывания для обеспечения выпуска качественной продукции и максимальной экономической эффективности в условиях серийного и массового автоматизированного производства.

Библиографический список использованной литературы

1. Якухин В.Г. Изготовление резьбы: справочник / В.Г. Якухин, В.А. Ставров; под ред. Якухина В.Г. — М.: Машиностроение, 1989. — 192 с.
2. Якухин В.Г. Оптимальная технология изготовления резьб / В.Г. Якухин — М.: Машиностроение, 1985. — 184 с.

Поступила в редакцию 27.04.2011 г.

Липка В.М., Рапацкий Ю.Л. Аналіз стійкості різьбонакатних інструментів в умовах автоматизованого масового виробництва та шляхи її підвищення

У статті викладені результати експериментальних досліджень та аналізу факторів, що визначають стійкість різьбонакатних інструментів в умовах автоматизованого масового виробництва. Запропоновано раціональний варіант технології виготовлення різьбонакатних інструментів підвищеної стійкості.

Ключові слова: різьбонакочування, різьбонакатний інструмент, стійкість, залишковий аустеніт, хіміко-термічна обробка

Lipka V.M., Rapatskiy J.L. Analysis of durability for the thread rolling tool in the automated mass production and ways of its increasing

The article presents the results of experimental studies and analysis of factors determining the durability of a thread rolling tool in the automated mass production. The rational option of the production technology for the thread rolling tool is suggested to improve durability.

Keywords: thread rolling, thread rolling tools, durability, retained austenite, chemical-thermal treatment