

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №6 (168). С.40-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №6 (168). P.40-48.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-40-48

Проблема технологического обеспечения стабильности операций глубокого сверления при обработке крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок на многоцелевых станках с ЧПУ

Александр Рональдович Ингеманссон¹, д.т.н.

Никита Андреевич Толстяков², аспирант

¹ Федеральний научно-производственный центр «Титан-Баррикады», Волгоград, Россия

² Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ aleing@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7963-393X>

² tolstijcov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В статье рассматривается проблема технологического обеспечения стабильности операций глубокого сверления, выполняемых на автоматизированном оборудовании – многоцелевых станках с ЧПУ. Рассмотрена группа деталей, изготавливаемых из крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок. Показано, что перевод обработки с универсального горизонтально-расточного станка с использованием комплекта специальных сверл и зенкеров позволяет исключить необходимость изготовления специального инструмента и повысить режимы резания, однако сохраняется проблема стабильности обработки. Исследование твердости таких поковок обнаружило неравномерность данной характеристики на различных участках заготовки. Несмотря на то, что с точки зрения статистики совокупность экспериментальных данных является однородной и технологический процесс металлургического производства поковки является стабильным, выявленное непостоянство твердости оказывается весьма чувствительным для последующей стадии механической обработки, а именно для такого специального вида обработки как глубокое сверление. Экспериментальные исследования стружкообразования при обработке отверстий подтвердили приведенное положение. Отмечено, что задача управления работоспособностью инструментов и качеством получаемых поверхностей должна решаться как на стадии технологической подготовки производства, так и непосредственно при выполнении операций. Последнее может быть решено посредством адаптивного управления, которое на современных серийно выпускаемых многоцелевых станках с ЧПУ реализуется по величине действующей мощности резания, что не требует переоборудования автоматизированного станочного парка механообрабатывающих участков. Приведено обоснование выбора факторов и уровней их варьирования для построения регрессионных моделей, предназначенных для технологической подготовки и адаптивного управления операциями глубокого сверления на многоцелевых станках с ЧПУ.

Ключевые слова: глубокое сверление, твердость, работоспособность инструмента, шероховатость, адаптивное управление, режимы резания.

Для цитирования: Ингеманссон А.Р., Толстяков Н.А. Проблема технологического обеспечения стабильности операций глубокого сверления при обработке крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок на многоцелевых станках с ЧПУ // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-40-48

Engineering support problem for the stability assurance in deep drilling operations for large-sized forging and pressing blanks work on multi-purpose CNC machines

Alexander R. Ingemansson¹, D.Eng.

Nikita A. Tolstyakov², PhD student

¹ "Federal Research and Production Center "Titan-Barricades", Volgograd, Russia

² Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ aleing@yandex.ru

² tolstijcov@mail.ru

Abstract. the article discusses the problem of technological stability assurance of deep drilling operations performed on automated equipment – multipurpose CNC machines. A group of large-sized forging parts and pressing blanks is viewed. It is shown that using a set of special drills and counterboring tools instead of universal horizontal milling machine makes it possible to avoid making special tools and contributes to the improvement of cutting modes, but the problem of stability assurance remains. A study of the hardness of such forgings revealed the unevenness of this characteristic in various parts of the workpiece. Despite the fact that, from the point of view of statistics, the totality of experimental data is homogeneous and the flow process of metallurgical forging production is stable, the revealed hardness variability turns out to be very sensitive for the subsequent stage of machining, namely for its special type like deep drilling. Experimental studies of chip formation in hole-making operations have proved that. It is noted that the task of managing the operability of tools and the quality of the resulting surfaces should be solved both at the stage of process design and just within operations. The latter can be solved through adaptive control, which is implemented on modern mass-produced multipurpose CNC machines in terms of the operating cutting power, which does not require retrofitting an automated machine-tool fleet for machining sites. The rationale for the selection of factors and their variation levels in the construction of regression models used for design process and adaptive control of deep drilling operations on multipurpose CNC machines is given.

Keywords: deep drilling, hardness, tool operability, roughness, adaptive control, cutting modes.

For citation: Ingemansson A.R., Tolstyakov N.A. Engineering support problem for the stability assurance in deep drilling operations for large-sized forging and pressing blanks work on multi-purpose CNC machines / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-40-48

Предпосылки проблемы обеспечения стабильности обработки глубоким сверлением на многоцелевых станках с ЧПУ

Технологическое обеспечение стабильности процессов механической обработки резанием остается актуальной проблемой для автоматизированных машиностроительных производств [1, 2]. От успешности ее решения зависят комплексные показатели надежности и эффективности использования технологической системы, в т.ч. коэффициент использования, коэффициент выхода годной продукции, коэффициент сохранения производительности.

В структурной модели процесса резания выделяют входные, функциональные и выходные параметры обработки. К входным переменным относят управляющие, определяющие и возмущающие факторы.

Стохастический характер свойственен возмущающим факторам, к которым принадлежат случайные изменения физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, припуска на обработку, статических и динамических характеристик станков и другие [3]. Нестабильность механических свойств, которую в цеховых условиях с достаточной степенью оперативности и универсальности можно оценивать по твердости, внутри партии заготовок или в пределах участков крупногабаритной заготовки имеет влияние на характер температурно-деформационной напряженности процесса резания. Постоянство силы резания, как функционального параметра обработки, находится в неотъемлемой зависимости от этого. В результате формируются предпосылки нестабильности периода стойкости инструмента и качества обработанных поверхностей как выходных

характеристик технологического процесса обработки резанием. Статистика гласит, что в механических цехах, укомплектованных автоматизированным оборудованием с ЧПУ, преждевременная потеря работоспособности является причиной замены инструментов в каждом втором случае [4].

Неравномерность механических свойств между различными участками крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок может оказывать заметное влияние на стабильность протекания процессов последующей механической обработки. Указанное непостоянство свойств является проявлением технологической наследственности предшествующих этапов получения кузнечного слитка, обработки давлением, термической обработки и переносит свое влияние на операции формообразования механической обработкой. Такое воздействие проявляется в особенности для специальных видов резания, таких как, например, глубокое сверление.

В полной мере указанные особенности можно наблюдать при обработке крупногабаритных корпусных деталей. В фокусе исследования находилась группа корпусных деталей, изготавливаемых из поковок призматической формы габаритами до 550×550×600 мм. Обработываемый материал – конструкционная легированная сталь. В маршруте изготовления присутствует объемная закалка с отпуском. Конструкторско-технологической особенностью рассматриваемого предмета является необходимость обработки глубоких сквозных отверстий с отношением длины к диаметру отверстия до $l/d_{отв.} = 20$.

Следует отметить, что конструктивные особенности деталей для изделий энергетической, нефтегазовой, атомной промышленности, специального машиностроения, а также судостроения вызывают необходимость выполнения сверления глубоких отверстий. Обработке подвергаются как тела вращения на станках для глубокого сверления токарной и вертлюжной компоновки, так и призматические корпусные детали с использованием специальных наладок и оборудования. На сегодняшний день

формируется тенденция концентрации выполняемых операций на многоцелевых станках с ЧПУ. Например, технология глубокого сверления корпусными сверлами со сменными пластинами или ружейными сверлами с напайными пластинами для обработки деталей энергетического машиностроения реализуется на токарно-фрезерных ОЦ [5]. Кроме этого, в современной промышленности применяются сверлильные станки для обработки решеток теплообменников, днищ, рабочих колес турбин, литейной форм, например, модели серии BW («ТБТ», Германия) и модели серий CAMDER G, GS, HS («WIM», КНР), с компоновкой, близкой к структуре горизонтального многоцелевого станка с ЧПУ. При этом кинематика оборудования позволяет осуществлять наклон оси шпинделя для получения глубоких отверстий в заготовках под заданным углом.

Внедренный ранее маршрут обработки с учетом уровня имевшихся средств технологического оснащения предполагал использование сконструированных и изготавливаемых специальных сверл, и зенкеров длиной до 1450 мм для горизонтально-расточного станка. С целью совершенствования технологии – исключения необходимости изготовления специальных инструментов и интенсификации режимов резания – была реализована обработка корпусными сверлами для глубокого сверления со сменными твердосплавными режущими и направляющими пластинами на горизонтальном многоцелевом станке с ЧПУ. Подача СОЖ выполняется по каналам внутри корпуса сверла под высоким давлением – 5 МПа. Непостоянство обрабатываемости материала в пределах одной крупногабаритной заготовки, между заготовками в одной партии, а также между заготовками из разных партий способствует недостаточной стабильности периода стойкости режущего инструмента и качества получаемых поверхностей [6].

Отсюда следует, что требуемое от технологического процесса обеспечение стабильности и качества обработки глубоких отверстий на многоцелевых станках с ЧПУ в условиях непостоянства свойств обрабатываемого материала и стохастического

характера процесса резания, формирует научную проблему, актуальную для современной практики машиностроительных предприятий.

Исследование неустойчивости обрабатываемости крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок

С целью установления характера неоднородной обрабатываемости в пределах размеров крупногабаритной заготовки между заготовками одной плавки, проходившими совместную термическую обработку в одной партии, а также между заготовками разных плавков были выполнены нижеописанные исследования.

В кузнечно-прессовых заготовках габаритами 550×550×600 мм во взаимно перпендикулярных плоскостях в области объемов материала, предстоящего к удалению при обработке сквозных отверстий, с постоянным шагом были проконтролированы значения твердости. Измерения выполнялись с интервалом, позволяющим получить по 10 совокупностей замеров вдоль соответствующих поверхностей призматической заготовки. Для исследований использовался переносной твердомер «Константа КТ» («Константа», Россия). Статистически обработанные результаты исследований сведены в табл. 1 [7].

1. Результаты исследования стабильности твердости материала кузнечно-прессовых заготовок, поступающих на обработку глубоким сверлением

1. Hardness stability research results for the material in forging and pressing blanks subjected to deep drilling

Предприятие-изготовитель заготовки	Номер плавки	Номер садки термообработки (закалка с отпуском)	Номер заготовки	Среднее значение твердости, HB	Стандартное отклонение HB	Коэффициент вариации %
А	0051	79	№ 06	316	40	12,5
	0079	76	№ 24	276	50	18,2
	0054	68	№ 04	341	23	6,6
Б	7842	78	№ 43	308	53	17,2
	7142	71	№ 52	287	51	17,8
			№ 44	321	36	11,2
			№ 57	337	27	8,2
			№ 51	335	39	12,5
			№ 48	320	10	3,2
			№ 46	335	21	6,2
	7280	72	№ 75	324	8	2,4
			№ 74	326	10	3,0
			№ 76	323	21	6,6
	7986	79	№ 93	329	17	5,2
			№ 89	327	35	10,7
	7239	72	№ 66	322	32	10,1
			№ 60	313	32	10,3

Установленное по данным экспериментальных исследований распределение случайной величины твердости обрабатываемого

материала подчиняется закону нормального распределения (рис. 1).

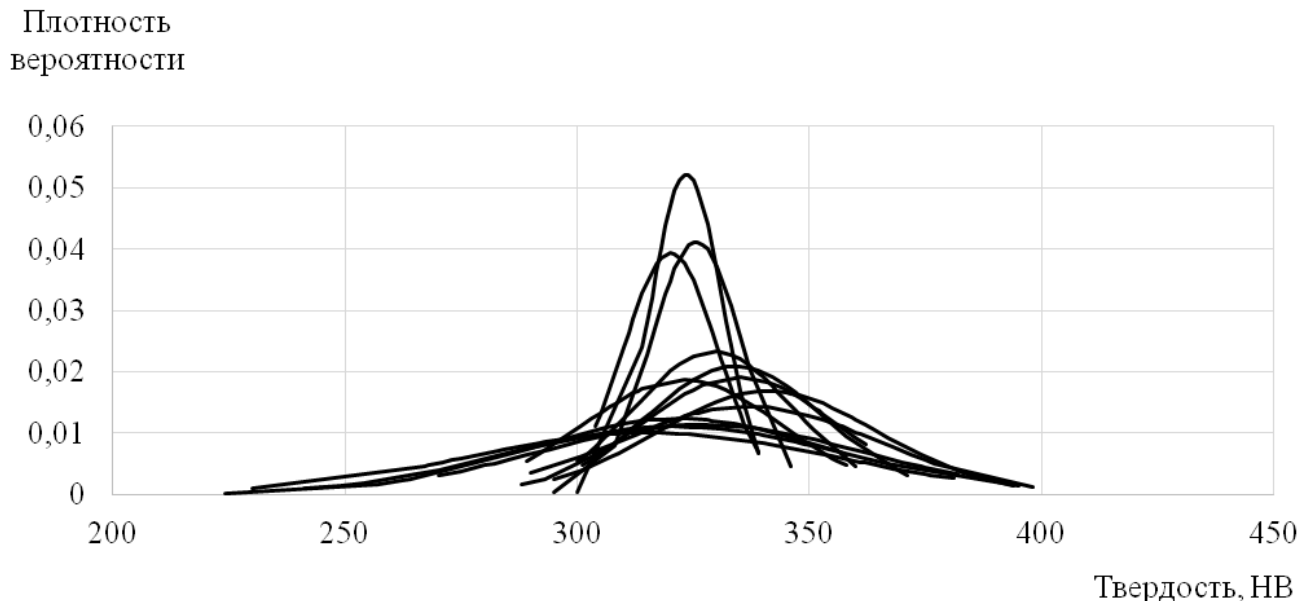


Рис. 1. Распределение случайной величины твердости обрабатываемого материала

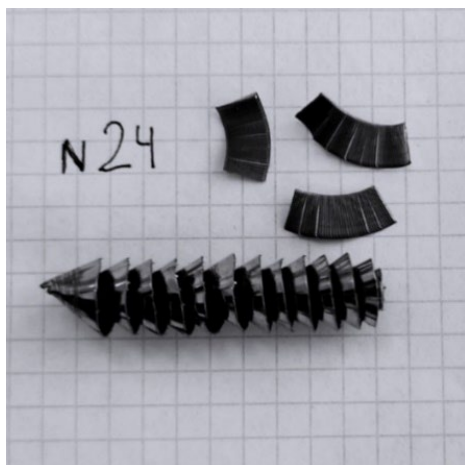
Fig. 1. Distribution of the random value of the work stock hardness

Анализ полученных величин стандартного отклонения и коэффициента вариации, который достигает 18,2 %, твердости материала крупногабаритных поковок демонстрирует непостоянство обрабатываемости в пределах объемов заготовки. Более того, зафиксировано трехкратное отличие величин коэффициента вариации твердости между заготовками одной плавки, проходившими совместную термическую обработку в одной партии, и между заготовками разных плавок (табл. 1). Несмотря на то, что с точки зрения статистики совокупность является однородной и технологический процесс металлургического производства поковок является стабильным (коэффициента вариации твердости не превышает 33 %), указанное непостоянство твердости оказывается весьма чувствительным для последующей стадии механической обработки, а именно для такого специального вида обработки как глубокое сверление [7].

Обнаруженный стохастический характер распределения твердости материала поковок переносит свое влияние на формирование

сопротивления деформированию в зоне первичных и вторичных деформаций, отсюда и на тепловыделение, а также на протекание процесса контактного взаимодействия в зоне резания. Представленные обстоятельства способствуют нестабильности периода стойкости инструмента и качества получаемых поверхностей. Операторы, встречающиеся с этим обстоятельством на практике при эксплуатации сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ, называют такое непостоянство свойств обрабатываемого материала «разнотвердостью». Так, при прохождении сверлом «мягких» участков заготовки рабочий вынужден сверх нормативного прерывать обработку для вывода инструмента из глубокого отверстия с целью контроля состояния режущих пластин и процесса стружкодробления [6].

Выполнены также исследования морфологии стружки, образующейся при глубоком сверлении отверстий на горизонтальном многоцелевом станке с ЧПУ в заготовках из представленной выборки (рис. 2).



а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Фотографии стружек, полученных при глубоком сверлении:

а – заготовка № 24; *б* – заготовка № 75; *в* – заготовка № 89; *г* – заготовка № 66

Fig. 2. Photographs of chips obtained by deep drilling:

a – blank № 24; *b* – blank № 75; *c* – blank № 89; *d* – blank № 66.

При обработке заготовки № 24, отличающейся наибольшей вариацией твердости, имело место наличие как элементных стружек с ненадежным скалыванием, так и сливных спиральных. Усредненный диаметр спиралей составлял 11 мм, а длина – 49,3 мм (рис. 2, *а*).

Во время сверления отверстий в заготовке № 75, имевший наименьший разброс механических свойств, стабильно образовывалась элементная стружка скалывания (рис. 2, *б*).

При обработке заготовок № 89 и № 66, характеризующихся коэффициентами

вариации 10,7 % и 10,1 %, соответственно, имели место как стружки с неравномерным скалыванием, так и спирали со средними диаметрами 10,3 мм и 9,8 мм и длиной 29 мм и 26 мм, соответственно (рис. 2, *в*, *г*).

Полученные результаты коррелируют с данными о непостоянстве механических свойств материала поковок. Наличие как элементной, так и сливной стружки при обработке заготовок № 24, 89 и 66, свидетельствует о наличии участков с неравномерной твердостью. В областях материала с повышенной пластичностью стружколом на сменной многогранной

пластине (СМП) при неизменной величине подачи инструмента работает ненадежно. В таких условиях эвакуация стружки затруднена, поэтому оператор многоцелевого станка вынужден принудительно прерывать обработку и варьировать подачу в ручном режиме. Особенно это заметно для заготовки № 24, имевшей наибольшую вариацию твердости.

Таким образом, результаты исследования непостоянства обрабатываемости крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок, свидетельствуют о необходимости разработки научно обоснованного подхода по учету выявленной нестабильности как на стадии технологической подготовки производства, так и на этапе непосредственного выполнения операции глубокого сверления.

Обоснование выбора факторов для построения математических моделей для управления обработкой глубоким сверлением на многоцелевых станках с ЧПУ

Задача управления работоспособностью инструментов и качеством получаемых поверхностей должна решаться как на стадии технологической подготовки производства, так и непосредственно при выполнении операций. Последнее может быть реализовано за счет использования адаптивного управления [8, 9].

Адаптивное управление на современных серийно выпускаемых многоцелевых станках с ЧПУ может реализовано по величине действующей мощности резания, что не требует переоборудования автоматизированного станочного парка механообрабатывающих участков. Для технологической подготовки производства и адаптивного управления необходимы надежные математические модели, связывающие входные, функциональные и выходные параметры процесса резания.

С целью разработки таких математических моделей для обработки глубоким сверлением выбраны следующие факторы: твердость обрабатываемого материала заготовки НВ; теплопроводность твердосплавной СМП, Вт/м·К; режимы резания – скорость резания м/мин и подача мм/об (табл. 2). Твердость является характеристикой обрабатываемости материала заготовки, которую с достаточной степенью универсальности и оперативности возможно определять в условиях механообрабатывающих участков. Теплопроводность инструментального материала определяет характер теплораспределения в зоне резания и, соответственно, характер контактного взаимодействия. В качестве функционального параметра процесса выбрана сила резания, H . В роли выходного параметра, отражающего качество обработанной поверхности, выбрана шероховатость Ra , мкм.

2. Факторы и уровни их варьирования для построения математической модели обработки глубоким сверлением

2. Factors and levels of their variation for constructing a mathematical model of deep drilling cut

Входные параметры	Уровень варьирования фактора		
	-1	0	+1
Твердость, НВ	220 НВ (КТ 60)	300 НВ (КТ 80)	380 НВ (КТ 100)
Теплопроводность λ , Вт/м·К	16 Вт/м·К	19 Вт/м·К	51 Вт/м·К
Подача S , мм/об	0,08 мм/об	0,1 мм/об	0,12 мм/об
Скорость резания v , м/мин	40 м/мин	55 м/мин	70 м/мин

В качестве материала заготовок, прошедших упрочняющую термообработку для достижения уровней варьирования твердости согласно табл. 2, использовалась конструкционная легированная сталь 12Х2НВФА.

В качестве инструмента применялись корпусное сверло мод. K5D34032-11 и СМП к нему, имеющие формы квадрата – периферийная (SPMT) и ломаного четырехгранника – центральная (ХОМТ) («Korloy», Ю. Корея). В экспериментальном исследовании для обеспечения уровней варьирования фактора теплопроводности запланированы твердосплавные СМП без износостойкого покрытия, а также с износостойкими PVD- и CVD-покрытиями, нанесенными методами химического осаждения из парогазовой фазы и физического осаждения из пароплазменной фазы, соответственно [10, 11]. При выборе уровней варьирования факторов скорости резания и подачи (табл. 2) учитывались рекомендации отечественной справочной литературы [12], производителей инструмента для сверления – «Votek» (Германия), «Korloy» (Ю.Корея), а также имеющийся опыт на механообрабатывающем участке, оснащенном многоцелевыми станками с ЧПУ.

Выводы

1. Обоснована актуальность проблемы технологического обеспечения стабильности операций глубокого сверления при обработке крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок на многоцелевых станках с ЧПУ.

2. Выполнено исследование непостоянства твердости на различных участках крупногабаритных поковок и, соответственно, нестабильной обрабатываемости на операциях сверления.

3. Приведено обоснование выбора факторов и уровней их варьирования для построения регрессионных моделей, предназначенных для технологической подготовки и адаптивного управления операциями глубокого сверления на многоцелевых станках с ЧПУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Плотников А. Л., Чигиринский Ю. Л., Тихонова Ж. С., Фролов Е. М., Крайнев Д. В. Как научить систему ЧПУ решать технологическую задачу по выбору надёжных значений параметров процесса металлообработки // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №. 3. С. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-3-32-39>.
2. Бутенко В. И., Лебедев В. А., Колганова Е. Н., Кадач Р. Г. Эффективные способы заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №. 11. С. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-44-48>.
3. Старков В. К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
4. Григорьев С. Н., Маслов А. Р. Обработка резанием в автоматизированном производстве: учебник. М.: Машиностроение, 2008. 372 с.
5. Шатцль Д., Коль Р. Глубокое сверление // РИТМ машиностроения. 2015. №. 5. С. 37–39.
6. Ингеманссон А. Р., Толстяков Н. А. Исследование рассеяния твердости крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок и влияния на обрабатываемость резанием // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 8. С. 18–21. doi: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-8-279-18-21>.
7. Толстяков Н. А., Ингеманссон А. Р. Влияние неравномерного распределения твердости в крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовках на характеристики стружкообразования на операциях глубокого сверления // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2024. № 3. С. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-3-286-30-33>.
8. Суслов А. Г., Петрешин Д. И., Шалыгин М. Г., Хандожко В. А. Автоматизированное технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №. 7. С. 24–33. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-24-33>.
9. Унянин А. Н., Финагеев П. Р. Исследование эффективности методики коррекции режима процесса механической обработки с изменяющимися во времени параметрами в условиях неопределенности технологической информации // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №. 12. С. 23–29. doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-23-29>.
10. Korloy. Metal cutting tools: catalogue. South Korea: Korloy Publ., 2017. P. 1060.
11. Верещака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
12. Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

REFERENCES

1. Plotnikov A.L., Chigirinsky Yu.L., Tikhonova Zh.S., Frolov E.M., Krainev D.V. Training of CNC system for solving a process task of ranging reliable values of metalworking operation parameters // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022. No. 3. pp. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-3-32-39>
2. Butenko V.I., Lebedev V.A., Kolganova E.N., Kalach R.G. Effective ways of sharpening metal-cutting tools made of rapid steel and hard alloys // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2024. No. 1., pp. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-44-48>
3. Starkov V.K. Physics and optimization of cutting materials. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 640 p.
4. Grigoriev S.N., Maslov A.R. Machining in automated production: textbook. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 372 p.
5. Schatzl D., Kohl R. Deep drilling // RHYTHM of mechanical engineering, 2015. No. 5. pp. 37–39.
6. Ingemansson A.R., Tolstyakov N.A. Investigation of hardness dispersion of large-sized forging and pressing blanks and their effect on machinability // Proceedings of the Volgograd State Technical University, 2023, No. 8, pp. 18–21. DOI: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-8-279-18-21>
7. Tolstyakov N.A., Ingemansson A.R. The effect of uneven hardness distribution in large-sized forging and pressing blanks on the characteristics of chip formation during deep drilling operations // Proceedings of the Volgograd State Technical University, 2024, No. 3, pp. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-3-286-30-33>
8. Suslov A.G., Petrishin D.I., Shalygin M.G., Khandozhko V.A. Automated technological support and improvement of the operational properties of machine parts // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2024, No. 7, pp. 24–33, DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-24-33>.
9. Unyanin A.N., Finogeev P.R. Study of the technique performance for the correction of the mode of the machining process with time-varying parameters in the conditions of technological information uncertainty // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2023. No. 12. pp. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-23-29>
10. Korloy. Metal cutting tools: catalogue. South Korea: Korloy Publ., 2017. P. 1060.
11. Vereshchaka A.S., Tretyakov I.P. Cutting tools with wear-resistant coatings. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 192 p.
12. Technologist's handbook: handbook / edited by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2019. 800 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.03.2025; одобрена после рецензирования 14.04.2025; принята к публикации 12.05.2025.

The article was submitted 23.03.2025; approved after reviewing 14.04.2025; assepted for publication 12.05.2025.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор А.Ю. Кленичева. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.05.2025. Выход в свет 30.05.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет» 241035,

Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+