

## Список літератури

1. Новиков, Ф.В. Теоретические основы технологии машиностроения: Учеб. / Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков, Н.И. Решетов. – Одесса. : ОНПУ, 2002. – 492 с. 2. Справочник метал листа : в 5-ти т. Т. 5 / Под ред. А.Н. Малова. – М. : Машгиз, 1960. – 1184 с. 3. Новиков Ф.В. Разработка математической модели обработки отверстий в высокоточных деталях / Ф.В. Новиков, В.И. Полянский // Тези доповідей XXI міжнародн. наук.-практич. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – С. 135. 4. Мальшико И.А. Осевые комбинированные инструменты (рекомендации по проектированию и эксплуатации) / И. А. Мальшико. – Донецк: ПКТИ, 1996. – 135 с. 5. Справочник технолога машиностроителя : в 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещеракова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение. 1985. – 496 с. 6. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ. В 2-х ч. – М. : Экономика, 1990. – 208 с.

## Bibliography (transliterated)

1. Novikov, F. V, A. A. Jakimov, G. V. Novikov and N. I. Reshetov. *Teoreticheskie osnovy tehnologii mashinostroenija*. Odessa: ONPU, 2002. Print. 2. Malov, A. N. *Spravochnik metallista*. Moscow: Mashgiz, 1960. Print. 3. Novikov, F. V. and V. I. Poljanskij. "Razrabotka matematicheskoj modeli obrabotki otverstij v vysokotochnyh detaljah." *Tezi dopovidej XXI mizhnarodn. nauk.-praktich. konf. "Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja"*. Kharkov: NTU "KhPI", 2013. Print. 4. Malyshko, I. A. *Oseveye kombinirovannye instrumenty (rekommendacii po proektirovaniju i jekspluatacii)*. Doneck: PKTI, 1996. 135. Print. 5. Kosilova, A. G. and R. K. Meshherjakov. *Spravochnik tehnologa mashinostroitelja*. Moscow: Mashinostroenie. 1985. Print. 6. *Obshhemashinostroitel'nye normativy vremeni i rezhimov rezanija dlja normirovanija rabot, vypolnjaemyh na universal'nyh i mnogocelovyh stankah s ChPU*. Moscow: Ekonomika, 1990. Print.

Надійшла (received) 10.02.2021

УДК 621.9.044

DOI: 10.20998/2079-004X.2021.1(3).03

**С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**Е.В. БАСОВА**, канд. техн. наук, науч. сотр. НТУ «ХПИ»;  
**Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;

## РОЛЬ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрен алгоритм реализации технологии изготовления качественной и точной машиностроительной продукции из труднообрабатываемых материалов на базе современных САД/САЕ/САМ/САРР-систем. Приведены особенности обработки закаленных сталей. Обоснованы перспективы энергетического подхода для определения области существования технологических режимов высокоскоростной обработки материалов. Приведены зависимости изменений физических параметров от увеличения скорости резания.

**Ключевые слова:** технология обработки, высокоскоростная обработка, САД/САЕ/САМ/САРР-системы, труднообрабатываемые материалы, энергетический подход, режимы обработки.

**С.С. ДОБРОТВОРСЬКИЙ, Є.В. БАСОВА, Л.Г. ДОБРОВЛЬСЬКА,**

## РОЛЬ ВІТЧИЗНЕВОГО МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА У СУЧАСНИХ УМОВАХ

Розглянуто алгоритм реалізації технології виготовлення якісної та точної машинобудівної продукції із важкооброблюваних матеріалів на базі сучасних CAD/CAE/CAM/CAPP-систем. Наведено особливості обробки загартованих сталей. Обґрунтовано перспективи енергетичного підходу для визначення сфери існування технологічних режимів високошвидкісної обробки матеріалів. Наведено залежність змін фізичних параметрів від збільшення швидкості різання.

**Ключові слова:** технологія обробки, високошвидкісна обробка, CAD/CAE/CAM/CAPP-системи, важкооброблювані матеріали, енергетичний підхід, режими обробки.

### S.S. DOBROVORSKII, E.V. BASOVA, L.G. DOBROVOLSKAYA, THE ROLE OF DOMESTIC ENGINEERING PRODUCTION IN MODERN CONDITIONS

An algorithm for implementing the technology for manufacturing high-quality and accurate engineering products from hard-to-cut materials based on modern CAD/CAE/CAM/CAPP systems is considered. The features of processing hardened steels are given. The prospects of the energy approach for determining the area of existence of technological modes of high-speed processing of materials are substantiated. The dependences of changes in physical parameters on the increase in cutting speed are given.

**Key words:** processing technology, high-speed processing, CAD/CAE/CAM/CAPP systems, hard-to-cut materials, energy approach, processing modes.

**Введение.** Качество и точность обработки сложнопрофильных поверхностей деталей зависят как от кинематических характеристик оборудования, так и от динамической, термической и статической устойчивости технологической системы. В условиях современного состояния отечественного машиностроительного производства чистовая обработка поверхностей деталей из

С.С. Доброворський, Є.В. Басова, Л.Г. Добровільська  
сложнообрабатываемых материалов, в том числе и из закаленных сталей, обеспечивается в основном абразивной обработкой. До последнего времени это объяснялось разным уровнем оборудования для шлифования и лезвийной обработки. Станки токарной и фрезерной групп не могли обеспечить точность и качество обработки, которые достигались при абразивных операциях. Кроме того технологический процесс изготовления сложнопрофильной продукции требовал применения большого количества инструмента, схем закрепления и базирования, и соответственно большого количества вспомогательных приспособлений, что негативно сказывалось на качестве и точности обработки. Однако с появлением нового поколения оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), которое имеет достаточную точность перемещений и жесткость технологической системы, перспектива высококачественной и высокоточной токарной и фрезерной обработки сложнопобрабатываемых материалов с минимальным количеством переустановок.

**Анализ работ и источников информации.** Анализ современных источников информации показывает [1], что при реализации технологии высокоскоростной обработки (ВСО) на обрабатывающих центрах (ОЦ)

повышенная локальная устойчивость процесса резания возникает тогда, когда частота импульсов врезания инструмента в материал больше собственной частоты колебаний самого нежесткого элемента технологической системы СПИЗ, как правило – инструмента. Для обеспечения жесткости инструмента при ВСО на ОЦ рекомендуется использовать современные термопатроны.

ВСО закаленных сталей – отдельная задача, которая требует глубокого изучения.

Анализа современных источников информации подчеркивает, что на сегодняшний день существует много исследований по лезвийной механообработке, однако мало практических работ, которые направлены на изучение физических и механических особенностей обработки закаленных сталей. Отсутствие понимания физико-механических процессов в зоне обработки привело к разрозненности в рекомендациях производителей режущего инструмента. В работах [2-6] сформулированы и аргументированы принципиальные отличия обработки закаленной стали:

- при обработке закаленной стали формирование суставчатой (пилообразной) стружки происходит за счет надлома обрабатываемого материала. То есть формирование разрыва материала происходит на открытой поверхности в тот момент, когда обрабатываемый материал достигает предельного напряжения сдвига. Следовательно, именно надлом отвечает за процесс стружкообразования;

- не смотря на то, что стружка надлома, полученная посредством адиабатического сдвига при резании труднообрабатываемых материалов, подобна суставчатой стружке, полученной при механообработке закаленной стали, - это два разных вида стружки, так как они имеют разные механизмы формирования;

- процесс стружкообразования характеризуется малым углом сдвига материала в плоскости обработки. Угол сдвига уменьшается с увеличением твердости обрабатываемого материала и слабо зависит от переднего угла режущей кромки инструмента;

- при обработке закаленной стали радиальная составляющая силы резания больше касательной, и эта разница увеличивается с развитием износа инструмента по задней поверхности режущей кромки. Это объясняется свойствами упругости обрабатываемого материала. Большое значение радиальной составляющей силы резания является первопричиной возникновения погрешности обеспечения точности при обработке деталей из закаленных сталей;

- тангенциальная и радиальная составляющие силы резания зависят от величины переднего угла режущей кромки инструмента. Отмечается, что при значении переднего угла режущей кромки в  $0^\circ$  твердость обрабатываемого материала не влияет на составляющие силы резания, однако при величине

угла  $-20^\circ$ ; и неизменной твердости материала значения компонент силы резания уменьшается;

- тангенциальная и радиальная составляющие силы резания зависят от износа инструмента по задней поверхности режущей кромки неодинаково. При увеличении износа по задней поверхности в диапазоне  $(0 \div 0,2)$  мм, радиальная составляющая силы резания увеличилась в 4 раза.

Учитывая сложность разработки конкурентоспособной технологии обработки закаленной стали необходимо учесть ряд вопросов, которые требуют глубокого понимания и изучения: во-первых, наличие угла режущей кромки при обработке хрупкого материала и его корреляция с направлением распространения разрушения с точки зрения технологии машиностроения может обеспечить целостность и износостойкость деталей машин в процессе эксплуатации; во-вторых, для обеспечения качества рабочих поверхностей необходимо понимание природы источников высокой температуры в зоне обработки закаленной стали, ее влияние на процесс резания, и как результат на формирование физико-механических характеристик обработанного материала и др.

**Цель исследования.** Целью работы является рассмотрение основных этапов создания конкурентоспособной технологии качественной и точной обработки сложнопрофильных деталей из труднообрабатываемых материалов в условиях развития отечественного машиностроения.

**Постановка задачи.** В результате оптимизации цен на ОЦ, расширение номенклатуры сложнопрофильных деталей, более эффективного программирования, а также целого ряда преимуществ многокоординатной обработки по сравнению с другими видами изготовления промышленной продукции появилась необходимость в поиске новых технологических решений обработки сложнопрофильных деталей с учетом всех этапов от проектирования до изготовления продукта в условиях автоматизированного производства с применением современных CAD/CAE/CAM/CAPP-систем. Создание новой технологии должно учитывать необходимость определения области существования технологических режимов высокоскоростной обработки на этапе планирования техпроцесса изготовления детали, что позволит минимизировать или даже исключить дорогостоящие испытания и отработку режимов.

**Выбор и обоснование рациональной структуры процесса изготовления деталей из закаленных сталей.** Разработка конкурентоспособной технологии изготовления сложнопрофильных деталей из закаленных сталей с применением технологии ВСО требует рассмотрения комплекса технологических решений от проектированию высокоточных CAD-моделей, до их изготовления на современных ОЦ.

I ЭТАП: CAD (3D) объемное моделирование – основа создания конкурентоспособной технологии. Задача этого этапа создание CAD моделей деталей, точность которых раз в 10 выше, чем допуск чистовой обработки.

Наши исследования показывают, что достичь точности моделей возможно посредством описания сложнопрофильных поверхностей *nurbs*-кривыми и *spline*-кривыми 5-го порядка, так как 4-ый порядок является не достаточным для обеспечения точности описания поверхности, а 6-й – характеризуется наличием большого количества ошибок при сшивке сегментов сплайна.

Разработка высокоточных 3D CAD-моделей позволяет получить высокоточную конструкторскую документацию на изделие.

II ЭТАП: САЕ-анализ на базе методов конечных элементов. Целью данного этапа является определение области существования рациональных режимов обработки закаленной стали. Для достижения цели необходимо изучение процесса резания, т.е. рассмотрение физико-механических особенностей процесса обработки закаленной стали. Для обеспечения точности обработки детали необходим прочностной расчет процесса обработки детали в условиях закрепления на ОЦ. Во избежание брака при изготовлении дорогостоящей продукции, необходима проверка точности работы механизма в сборке.

В процессе выполнение этого этапа нам удалось установить, что чем меньше энергии потребляется на начальный процесс резания, и чем быстрее достигается энергетический пик процесса механообработки, тем стабильнее дальнейшее течение и разрушение материала [7]. Такой результат дал нам основание для разработки подхода к определению области существования технологических режимов высокоскоростной обработки металлов, в том числе и закаленных сталей, на базе МКЭ.

Мы провели ряд экспериментов с применением имитационного моделирования процесса ВСО закаленной стали 38Х2МЮА в среде 3D САЕ-модуля [8], моделирование велось с изменением глубины резания от 0,1 до 0,3 мм (рис. 1).

Из результатов моделирования установили, что диапазон существования режимов ВСО находится в ограниченной области глубин резания (для закаленной хромомолибденовой стали  $h=(0.1\div 0,2)$ ). С превышением глубины резания, выше критической, тепловые потоки в зоне обработки растут и превышают предельно допустимые значения, что, в свою очередь, может привести к появлению прижогов и неблагоприятных напряжений растяжения в нарушено-деформированном слое материала. Кроме того, результатом превышения глубины резания является нарушение условия пластического течения материала, при котором реализовываются условия разрушения материала при ВСО (рис. 1) [9].

III ЭТАП: САРР-автоматизированная система технологической подготовки производства. На этом этапе разработки технологии с ВСО необходимо выполнить выбор и обоснование рационального маршрута обработки сложнопрофильной детали, на основании заданной модели изделия,

выполненной в САД-системе и с учетом возможностей ОЦ, режущего инструмента и результатов исследований, полученных из САЕ-анализа.

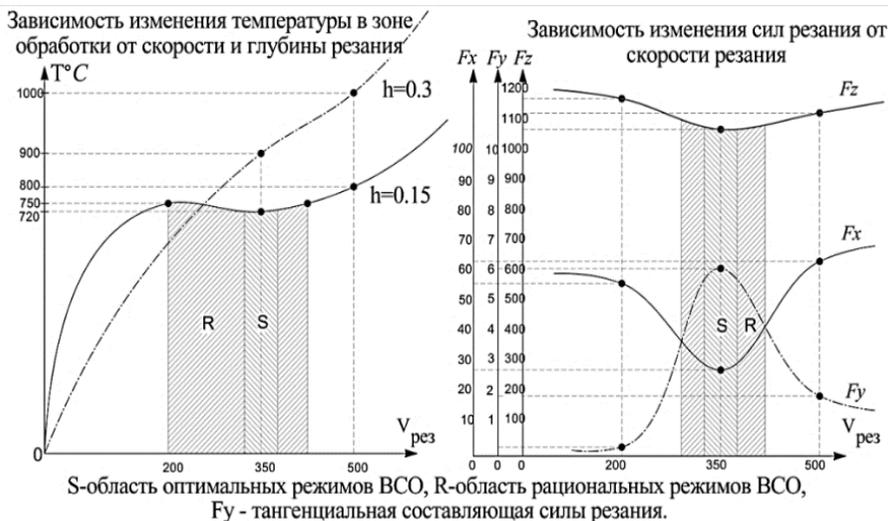


Рис. 1 – Зависимость изменений физических параметров от скорости резания

Выбор рационального маршрута технологического процесса изготовления сложнопрофильных деталей из труднообрабатываемых сталей зависит от требуемых качественных характеристик, выдвигаемых к рабочим поверхностям готового изделия. От выбора ТП зависит стоимость изготовления продукции.

IV ЭТАП: разработка САМ-программы. Этот этап требует разработки высокоточных и высококачественных траекторий перемещения инструмента на современных ОЦ. Возможности универсальных станков и устаревшего оборудования с ЧПУ крайне ограничены для реализации ВСО. При разработке высокоточных алгоритмов и управляющих программ, пригодных для современных систем с ЧПУ необходимо учитывать перемещение инструмента, таким образом, чтоб исключить зарезание прилежащих поверхностей. Разработка высокоточных траекторий возможна при реализации описания траектории перемещения инструмента посредством *nurbs*-интерполирования, либо кривыми 5-го порядка по высокоточным САД-моделям детали. Разработка высокоточных управляющих программ (УП) позволяет получить точность при 5<sup>м</sup>-координатной обработке равной 10-11 мкм, при позиционной обработке (3+2) – достигаемая точность равна 4-5 мкм.

V ЭТАП: изготовление сложнопрофильных деталей на современном оборудовании. На этом этапе выполняют обработку сложнопрофильной

детали на основании полученных результатов предварительных этапов из CAD/CAE/CAPP/CAM-систем.

VI ЭТАП: измерение готового изделия с помощью автоматизированной системы измерения станка.

Реализация такой технологии перспективна в условиях единичного и мелкосерийного производства.

**Выводы.** Учет всех равнозначно важных этапов от проектирования до изготовления детали на современных обрабатывающих центрах с применением современных CAD/CAE/CAPP/CAM-систем, является единственным направлением разработки высококачественной технологии, которая позволит получить конкурентоспособную продукцию и, одновременно, оптимизировать затраты на ее изготовление.

### Список литературы

1. Schmitz T.L. High-Speed Machining Frequency Response Prediction for Process Optimization / T.L. Schmitz, M. Davies, M. Kennedy // In Proceedings of the 2nd International Seminar on Improving Machine Tool Performance, July 2000. North Caroline, – 2000. – 25 p. 2. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. / В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 590 с.
3. Внуков Ю. Н. Особенности расчета составляющих силы резания при торцевом фрезеровании сферическими фрезами / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць НТУ «ХП». – Вып.5.- X., 2010. – С. 12-17. 4. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с. 5. Яцерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Яцерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Минск: Высшая школа, 1990. – 512 с. 6. Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент / В.А. Аршинов, Г.А. Алексеев. – М.: Машиностроение, 1976. – 440 с. 7. Добротворский С.С. Моделирование процесса высокоскоростного фрезерования закалённых сталей методом конечных элементов / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, С.А. Щучев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – X.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2012. – Вып.55. – С. 20-27. 8. Добротворский С.С. Исследование влияния технологических параметров процесса высокоскоростного фрезерования на качество обработки закалённых сталей / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Р.И. Соломатин / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – X.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2012. – Вып.60. – С. 54-62. 9. Басова Е.В. Технологическое обеспечение качества и точности поверхностей деталей из закалённых хромомолибденовых сталей методом высокоскоростного фрезерования: дис... канд. техн. наук : 05.02.08 / Басова Евгения Владимировна. – Харьков, 2014. – 236 с. – Библиогр. : с. 214–226.

### Bibliography (transliterated)

1. Schmitz T.L., Davie M., Kennedy M. High-Speed Machining Frequency Response Prediction for Process Optimization. In Proceedings of the 2nd International Seminar on Improving Machine Tool Performance, July 2000. North Caroline, – 2000. – P.25 2. Poduraev V.N. Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov. – Moscow: Vysshaja shkola, 1974. – 590 p. 3. Vnukov Ju.N., Sarzhinskaja A.G. Osobennosti rascheta sostavlajushhij sily rezanija pri torcevom frezerovanii sfericheskimi frezami. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac' NTU «HPI». – Vol.5. - Kharkov, 2010. – 12-17. 4. Sulima A.M., Shulov V.A., Jagodkin Ju.D. Poverhnostnyj sloj i jekspluatacionnye svojstva detalej mashin. – Moscow: Mashinostroenie, 1988. – 240 p. 5. Jashhericyn

*P.I., Eremenk M.L., Fel'dshtejn E.Je.* Teorija rezanija. Fizicheskie i teplovyje processy v tehnologicheskix sistemah. – Minsk: Vysshaja shkola, 1990. – 512 p. **6.** *Arshinov V.A., Alekseev G.A.* Rezanie metallov i rezhushhij instrument. – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 440 p. **7.** *Dobrotvorskij S.S., Basova E.V., Shhuchev P.A.* Modelirovanie processa vysokoskorostnogo frezerovanija zakaljonnyh stalej metodom konechnykh jelementov. Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr. – Kharkov: Nac. ajerokosm. un-t «HAI», 2012. – Vol.55. – P. 20-27. **8.** *Dobrotvorskij S.S., Basova E.V., Solomatin R.I.* Issledovanie vlijanija tehnologicheskix parametrov processa vysokoskorostnogo frezerovanija na kachestvo obrabotki zakalennyh stalej. Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr. – Kharkov.: Nac. ajerokosm. un-t «HAI», 2012. – Vol.60. – P. 54-62. **9.** *Basova E.V.* Tehnologicheskoe obespechenie kachestva i tochnosti poverhnostej detalej iz zakalennyh hromomolibdenovyh stalej metodom vysokoskorostnogo frezerovanija: dis.... kand. tehn. nauk : 05.02.08 / *Basova Evgenija Vladimirovna.* – Kharkov, 2014. – 236 p. – Bibliogr. : P. 214–226.

*Посмунна (received) 30.01.2021*

УДК 621:519

DOI: 10.20998/2079-004X.2021.1(3).04

***Н.Р. ВЕСЕЛОВСЬКА***, д.т.н., проф. ВНАУ, Вінниця;

***О.А. ПЕРМЯКОВ***, д.т.н., проф. НТУ «ХПІ»

## **МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ**

Основна ідея роботи полягає в розробці принципово нового підходу до моніторингу верстатного комплексу механічної обробки, сутність якого полягає в організації методики керування процесом механічної обробки на основі єдиного інтегрованого інформаційного середовища адаптованого до універсального комплексу комп'ютерного моделювання Matlab/Stateflow та Matlab/Simulink, при структурному поданні всіх складових процесу механічної обробки та