



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Рационализация режимов поверхностной закалки ВЭН ТВЧ рабочих поверхностей пуансона в условиях гибридной обработки

Вадим Скиба^{1, а, *}, Никита Вахрушев^{1, b}, Кристина Титова^{1, c}, Алексей Черников^{2, 1, d}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² ОАО «ГЛК-Промышленные технологии», ул. Большевикская, 177, цех 16, г. Новосибирск, 630083, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  skeeba_vadim@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-2273-5329>,  vah_nikit@mail.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-2708-3171>,  krispars@yandex.ru, ^d  <https://orcid.org/0009-0006-9412-7687>,  aleksey.chernikov.97@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.06(07): 621.785

История статьи:

Поступила: 14 июня 2023

Рецензирование: 14 июля 2023

Принята к печати: 27 июля 2023

Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Гибридное оборудование
 Многолезвийная механическая обработка
 Высокоэнергетический нагрев
 Резание
 Индукционная закалка

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00945, <https://rscf.ru/project/23-29-00945/>.

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие кластера гибридных металлообрабатывающих систем в станкостроении сопряжено с рядом позитивных последствий. Во-первых, такие системы помогают сократить затраты на производство путем оптимизации использования ресурсов и энергии. Это особенно актуально в условиях повышенной конкуренции и стремления к экономии. Во-вторых, гибридные системы обеспечивают возможность производства качественной продукции с повышенной производительностью. Благодаря интеграции различных функций в одном технологическом оборудовании процессы металлообработки становятся более эффективными и точными. Это позволяет снизить количество брака и повысить качество конечной продукции. Кроме того, гибридные металлообрабатывающие системы обладают автономной функциональностью, что особенно важно в гибком машиностроительном производстве, где требуется быстрая переналадка и адаптация к различным производственным задачам. Таким образом, гибридные металлообрабатывающие системы представляют собой важный шаг в развитии современного машиностроения, способствующий сокращению затрат, повышению производительности и обеспечению высокого качества продукции. **Цель данной работы** заключается в повышении производительности и снижении энергозатрат при поверхностно-термическом упрочнении деталей машин посредством использования концентрированных источников энергии в условиях интегральной обработки. **Теория и методы.** Для достижения поставленной цели были проведены исследования возможного структурного состава и компоновки гибридного оборудования, интегрирующего механические и поверхностно-термические процессы. При разработке теории и методов были учтены основные положения структурного синтеза и компонентности металлообрабатывающих систем. Теоретические исследования основаны на применении системного анализа, геометрической теории формирования поверхностей и конструирования металлообрабатывающих станков. Эксперименты проводились на модернизированном многоцелевом обрабатывающем центре MC 032.06, оснащённом дополнительным источником энергии, в качестве которого использовался сверхвысокочастотный генератор тиристорного типа СВЧ-10 с рабочей частотой тока 440 кГц, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты. Структурные исследования производили с применением оптической и растровой микроскопии. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя детали оценивали посредством механического и рентгеновского методов определения остаточных напряжений. Микротвердость упрочнённого поверхностного слоя детали оценивали на приборе Wolpert Group 402MVD. **Результаты и обсуждение.** Представлена оригинальная методика проведения структурно-кинематического анализа для предпроектных исследований гибридного металлообрабатывающего оборудования. Разработаны методологические рекомендации по модернизации металлорежущих станков, позволяющие осуществить высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) на стандартной станочной системе и создать наукоемкое технологическое оборудование с расширенными функциональными возможностями. Экспериментально подтверждено, что внедрение предлагаемого гибридного станка в производство в сочетании с рекомендациями по назначению режимов ВЭН ТВЧ при интегральной обработке деталей типа «пуансон» позволяет увеличить производительность поверхностной закалки в 36–40 раз и снизить энергозатраты в 6 раз.

Для цитирования: Рационализация режимов поверхностной закалки ВЭН ТВЧ рабочих поверхностей пуансона в условиях гибридной обработки / В.Ю. Скиба, Н.В. Вахрушев, К.А. Титова, А.Д. Черников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 63–86. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-63-86.

*Адрес для переписки

Скиба Вадим Юрьевич, к.т.н., доцент, с.н.с.

Новосибирский государственный технический университет,
 пр. К. Маркса, 20,

г. Новосибирск, 630073, Россия

Тел.: +7 (383) 346-17-79, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Введение

В промышленно развитых странах объем продукции металлообработки составляет от 35 до 40 % от общего производства продукции [1–3]. В свою очередь, на промышленный сектор приходится более 50 % мирового потребления энергии, из которых на страны, не входящие в Организацию экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), приходится до 67 %. Использование энергии и ресурсов в производственном секторе составляет порядка 40 % и 25 % мирового потребления соответственно. В последнее время концепция обеспечения устойчивого производства набирает обороты благодаря осознанию колоссального экологического воздействия, оказываемого на окружающую среду посредством значительного использования энергии и ресурсов [1–6]. Сложилось четкое понимание, что устойчивый рост производства возможен только лишь при реализации таких условий изготовления продукции, при которых используются процессы, сводящие к минимуму негативное воздействие на окружающую среду, сохраняющие энергию и природные ресурсы, безопасные для сотрудников, населения и потребителей и являющиеся экономически обоснованными. Следовательно, успех развития того или иного производства в значительной степени зависит от эффективного использования металлообрабатывающих станков.

В связи с этим в стратегически важной и базовой отрасли машиностроения – станкостроении – сформировался кластер гибридных металлообрабатывающих систем, при проектировании и создании которых разработчики придерживаются принципа полифункциональной интеграции [4, 7–18]. Одним из вариантов такого высокотехнологичного интегрального оборудования являются станки, объединяющие несколько различных по природе технологических процессов (рис. 1). Например, это может быть фрезерование или точение с применением лазерного или плазменного нагрева (Laser Assisted Machining (LAM) или Plasma Assisted Machining (PAM)); абразивное шлифование – поверхностная закалка посредством дополнительного источника тепла; точение – закалка с использованием концентрированного источника энергии – ультразвуковая упрочняюще-отделочная обработка; токарная обработка – закалка высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты – алмазное выглаживание и др. [7, 14, 17, 19–70].

Стремление конструкторов к увеличению технологического потенциала станков и обеспечению автономной работы гибридного оборудования в гибком производстве привело к появлению и развитию данного класса оборудования [7–9, 14, 16–21, 32–37, 47]. Промышленное апробирование показало положительные результаты, подтверждающие существенное сокращение производственного цикла изготовления деталей

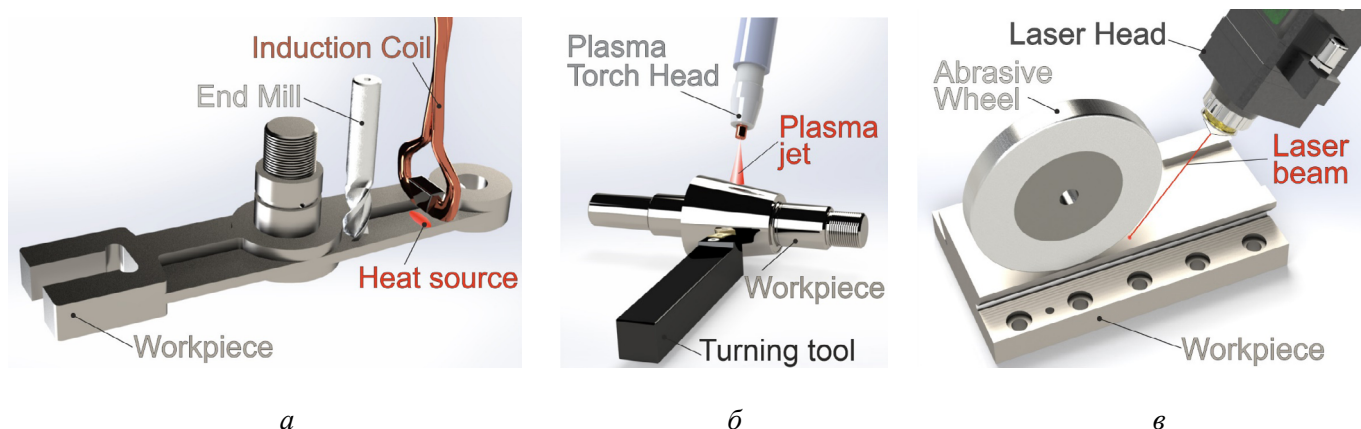


Рис. 1. Разновидности гибридных металлообрабатывающих станков, объединяющих механическую обработку с различными источниками тепла:

а – фрезерование с применением индукционного нагрева; *б* – точение с применением плазменного нагрева; *в* – шлифование с применением лазера

Fig. 1. Varieties of hybrid metalworking machines that combine machining with various heat sources: *a* – Induction Assisted Milling (IAM); *б* – Plasma Assisted Turning (PAT); *в* – Laser Assisted Grinding (LAG)

машин и уменьшение ресурсозатрат при использовании таких систем [7, 10, 14, 20–74].

Объектом проведенных исследований является технологический процесс изготовления пуансона листогибочного прессы, включающий в себя следующие операции: механическая обработка – фрезерование и поверхностная закалка – высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (рис. 2). При разработке классического технологического процесса изготовления детали операции поверхностно-термического упрочнения и фрезерования традиционно проводятся на

разном оборудовании и в разных цехах машиностроительного предприятия. В результате этого на термической операции необходимо получить упрочнение глубже, чем задано рабочим чертежом, а затем на финишной механической операции приходится удалять самую эффективную часть поверхностного слоя. Из-за такого подхода наблюдается снижение производительности как на поверхностно-термической, так и на механической операции, а также увеличение энергозатрат на обоих этапах технологического процесса [7, 14, 17, 21, 47, 61, 71–75].

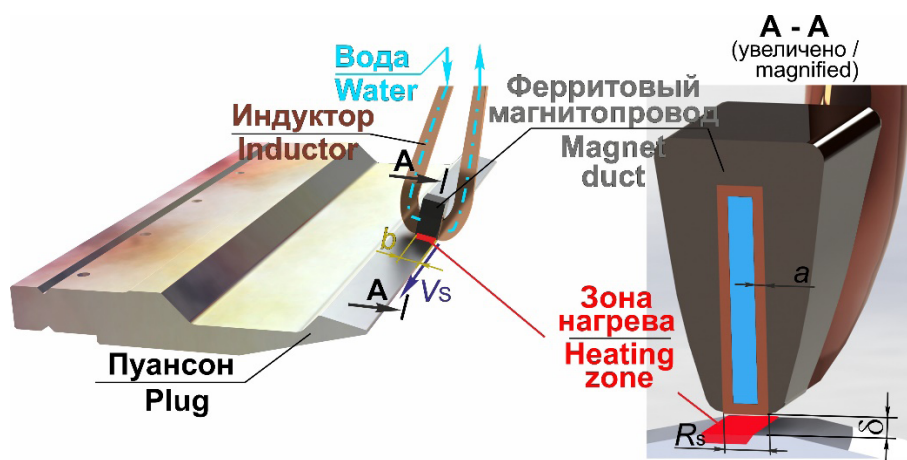


Рис. 2. Схема обработки пуансона при ВЭН ТВЧ

Fig. 2. Pattern of HFC hardening of a punch

Для решения указанной проблемы предлагается объединить две операции на одном металлообрабатывающем станке. С учетом современного развития микропроцессорной техники в области высокочастотных промышленных установок тиристорного типа [76–81], а также принципов удобного интегрирования в гибридную станочную систему в нашей работе мы рассматриваем использование высокочастотных генераторов типа СВЧ-10 мощностью 10 кВт [7, 14, 61, 82].

Актуальной задачей становится разработка новых методик назначения режимов обработки, которые будут учитывать взаимосвязь между объединяемыми операциями технологического процесса. Эти технологические рекомендации должны обеспечивать получение деталей с заранее заданной точностью и определенными физико-механическими свойствами их рабочих поверхностей [7, 14, 17, 47, 61, 71–75, 83].

Целью работы является разработка методики назначения рациональных режимов закалки ВЭН ТВЧ, обеспечивающих в условиях интегральной обработки повышение производительности и снижение энергозатрат при поверхностно-термическом упрочнении рабочих поверхностей пуансона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Разработать методику структурного анализа, позволяющую проводить эффективные предпроектные исследования в процессе разработки гибридного металлообрабатывающего оборудования. В этой методике должна быть учтена возможность интеграции источника концентрированной энергии в стандартную станочную систему.

2. Осуществить практическое испытание комплекса оборудования, реализующего технологию ВЭН ТВЧ, с целью доказательства эф-

фektivности ее внедрения в производство. В процессе апробации провести оценку эффективности исследуемой технологии в соответствии с заданными критериями.

Методика экспериментального исследования

Исполнительные движения гибридной металлообрабатывающей системы (ГМС) и необходимое количество их настраиваемых параметров определялись посредством применения структурно-кинематического синтеза механизмов металлорежущих станков [14, 82, 84–87]. Основные положения структурного синтеза и компо넲тики рассматриваемых систем, приведенные в работах [14, 82, 84–96], использовались для проведения исследований предполагаемого структурного состава и компоновки ГМС, в которой интегрированы поверхностно-термическая обработка и механические операции.

Материалы и методы натурных экспериментов

Для натурных экспериментов был выбран пуансон листогибочного пресса (рис. 3), изготовленный из стали У10А (табл. 1). Состав исходного материала определяли на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 3460.

Для определения линейных операционных размеров, учитывая требуемую глубину термоупрочненного слоя, использовали теорию размерных цепей и методику, представленную в соответствующих работах [97, 98].

Эксперименты проводились на модернизированном многоцелевом обрабатывающем центре МС 032.06, оснащенный дополнительным источником энергии, в качестве которого использовался сверхвысокочастотный генератор тиристорного типа СВЧ-10 с рабочей частотой тока 440 кГц, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты.

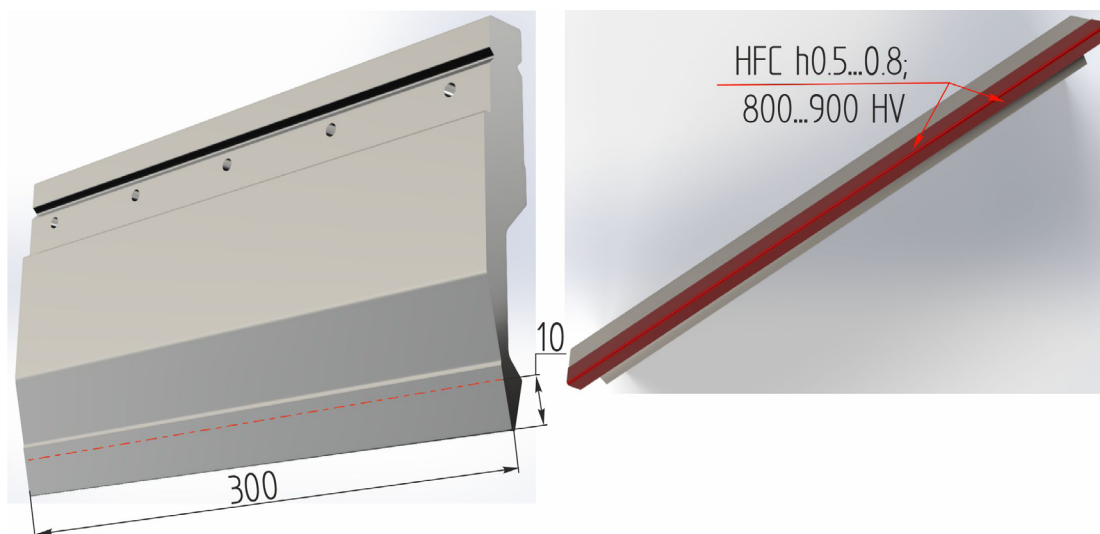


Рис. 3. Пуансон листогибочного пресса

Fig. 3. Press brake plug

Таблица 1

Table 1

Химический состав исходного материала

Chemical compositions of initial material

Сталь / Steel	Массовая доля элемента, % / Mass content of elements, [%]							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
У10А	1,01	0,25	0,21	0,017	0,022	0,18	0,17	0,15

Структурные исследования образцов проводились на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m и на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP, который оснащен энергодисперсионным анализатором INCA X-ACT (Oxford Instruments). Микроструктура образцов выявлялась с использованием 5%-го спиртового раствора азотной кислоты и насыщенного раствора пикриновой кислоты в этиловом спирте с добавлением поверхностно-активных веществ [99].

Микротвердость упрочненного поверхностного слоя деталей оценивали с помощью прибора Wolpert Group 402MVD. Остаточные напряжения измеряли с использованием рентгеновского метода на дифрактометре высокого разрешения ARL X'TRA и механического разрушающего метода – послойного электролитического травления образца [100, 101]. Для выявления дефектов поверхностного слоя использовали визуально-оптический метод с применением микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m, капиллярный метод и токовихревой метод с применением вихревого дефектоскопа ВД-70.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований производилась в программных продуктах Statistica, Table Curve 2D и Table Curve 3D.

Результаты и их обсуждение

В процессе разработки интегрального металлообрабатывающего оборудования планируется внедрение метода высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты на гибридном станке во время одного из технологических этапов. Учитывая особенности конструкции индукторов для этого процесса, поверхностный нагрев обрабатываемой поверхности осуществляется локализованными участками, размеры которых определяются шириной активного провода индуктора и длиной ферритового магнитопровода (рис. 2). Для обеспечения поверхностной закалки необходимы согласованные движения заготовки и инструмента, аналогичные тем, которые используются при фрезеровании [7, 14, 17, 47, 82, 87]. Структурно-кинематический анализ показал, что на всех этапах интегральной обработки (предварительное фрезерование, закалка токами высокой частоты и чистовое фрезерование)

требуется аналогичный набор исполнительных движений и настраиваемых параметров.

Последующий синтез обобщенной кинематической структуры разрабатываемой гибридной металлообрабатывающей системы выполнялся на основе пятикоординатного обрабатывающего центра MC 032.06 с CNC-системой управления, предназначенного для высокопроизводительной обработки произвольно расположенных поверхностей деталей, установленных на рабочем столе (рис. 4). При этом методе формулу компоновки можно представить в следующем виде:

$$[CAY0XZ] \{ [\hat{D}_h] + [d] \},$$

где A и C – поворотные оси стола; Y – вертикальное перемещение стола с заготовкой; X и Z – линейные перемещения инструмента; \hat{D}_h – вращение шпинделя с режущим инструментом; d – установочное вращательное движение индуктора. Блок D_h , выполняющий главное движение резания при фрезеровании, дополнительно помечен знаком \wedge .

После проведения всестороннего анализа требуемой структурной формулы компоновки гибридного оборудования, кинематической структуры станка MC 032.06 и жесткости его базовых узлов были выявлены основные направления модернизации указанной модели металлообрабатывающего оборудования. Проведенный комплекс предпроектных исследований позволил подготовить рабочую документацию для реализации гибридного технологического оборудования, объединяющего механическую и поверхностно-термическую обработку (рис. 5).

В результате расчетов технических характеристик гибридного металлообрабатывающего оборудования было зафиксировано, что для обеспечения сравнимого с механическими операциями уровня производительности формообразования необходимо осуществлять обработку ВЭН ТВЧ на скоростях порядка $V_s \in [50, 100]$ мм/с. Проведение натурных экспериментов позволило определить диапазон удельных мощностей источника $q_s(h, V_s)$, с которыми требуется производить обработку ВЭН ТВЧ: $q_s \in [1,5; 4,0] 10^8$ Вт/м².

Для подтверждения эффективности внедрения разработанного гибридного оборудования рассмотрим конкретный пример: финишную стадию технологического процесса обработки

пуансона (см. рис. 3). В нашем примере приведены две различные схемы обработки: с использованием стандартной заводской технологии и с применением предлагаемой интегрированной обработки. Анализ представленных данных позво-

лит подтвердить эффективность внедрения разработанного гибридного металлообрабатывающего оборудования и продемонстрировать преимущества, которые оно может принести по сравнению с традиционными методами обработки.

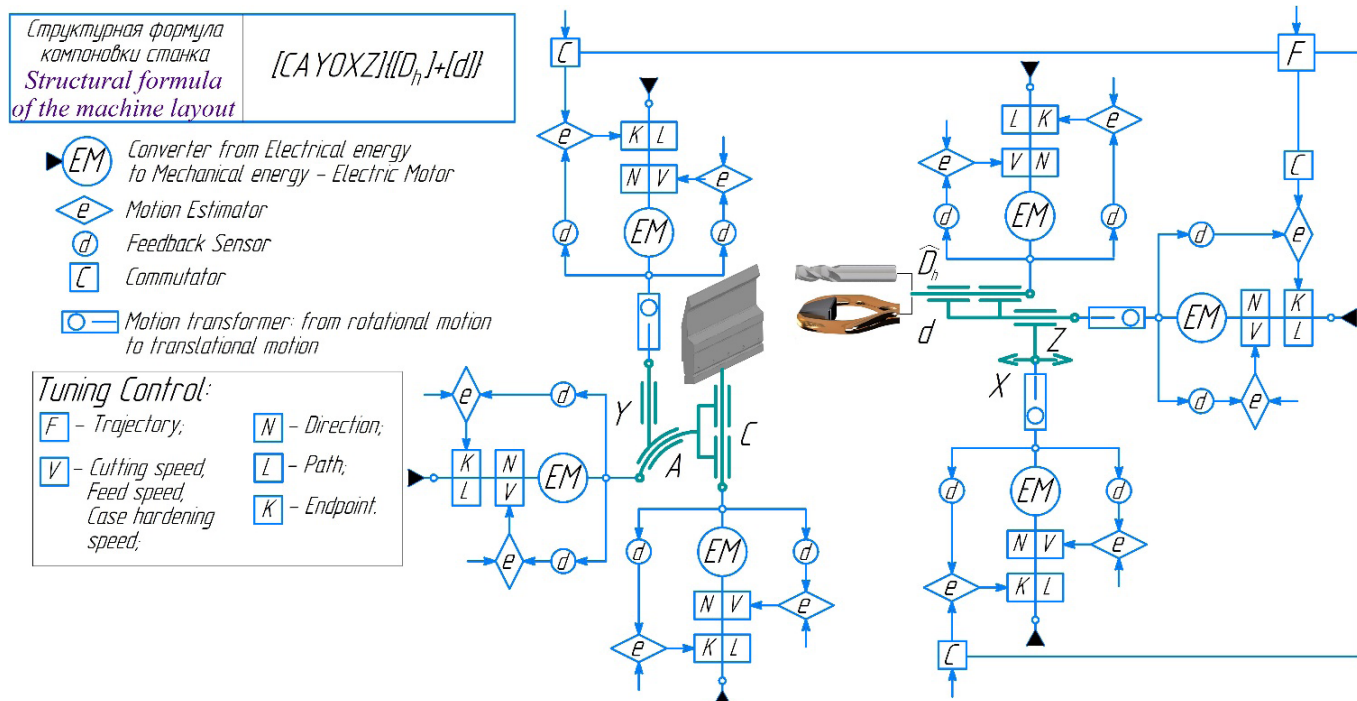


Рис. 4. Структурная схема гибридного металлообрабатывающего станка

Fig. 4. Block schematic diagram of the hybrid metalworking machine

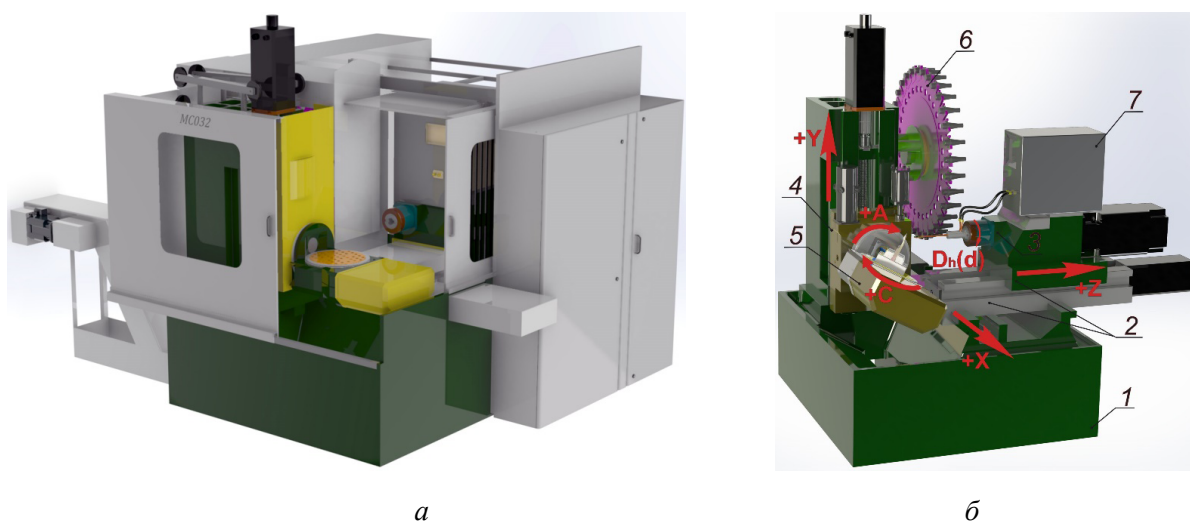


Рис. 5. Гибридный металлообрабатывающий станок:

а – общий вид станка; б – принципиальная компоновка интегрального станочного комплекса: 1 – станина; 2 – крестовый суппорт; 3 – шпиндельный узел; 4 – вертикальные салазки; 5 – поворотный стол; 6 – магазин для инструментов; 7 – сверхвысокочастотный генератор тиристорного типа СВЧ-10

Fig. 5. Hybrid metal-working machine:

а – general view of the machine; б – basic layout of the integral machine tool complex: 1 – machine bed; 2 – dual slides; 3 – spindle assembly; 4 – vertical slide; 5 – turntable; 6 – tool magazine; 7 – microwave thyristor-type generator SHF-10

Согласно заводскому технологическому процессу изготовления пуансона после предварительной механической обработки выполняется операция «поверхностная закалка ТВЧ». В этой операции необходимо учесть технологическую глубину закали, принимая во внимание последующую финишную механическую обработку (шлифование). Технологическая глубина закали в этом случае должна составлять $A_T = 0,84^{+0,1}$ мм [97, 98]. Однако стоит отметить, что согласно данным предприятия примерно 7 % изготовленных деталей подлежат выбраковке из-за наличия прижогов и микротрещин на поверхности, образующихся в процессе операции «шлифование».

Для достижения указанной глубины упрочненного слоя с использованием генератора частотой 440 кГц требуется реализовать поверхностную схему нагрева. В такой схеме удельная мощность и скорость движения источника нагрева будут ниже по сравнению с объемной схемой. Активный провод индуктора имеет ширину $R_S = 4$ мм и длину $b = 15$ мм, что соответствует удельной мощности $q_S = 1,2 \cdot 10^7$ Вт/м² и скорости $V_S = 2$ мм/с.

Для закали детали необходимо обработать два участка общей длиной $300 \times 2 = 600$ мм. Оба участка обрабатываются за два продольных перемещения петлевого индуктора относительно детали. Общая длина хода инструмента (перемещение вдоль оси X) с учетом захода и выхода индуктора при непрерывно-последовательной схеме нагрева составляет $l = (300 + 8 + 4) \times 2 = 624$ мм. При таких параметрах основное время равно $T_o = l / V_d = 312$ с. В соответствии с общемашиностроительными нормами на термическую обработку на установках ТВЧ вспомогательное время для базирования детали типа «плоскость» составляет $T_{всп} = 15$ с. Таким образом, штучная производительность равна

$$P_{шт} = \frac{1}{T_o + T_{всп}} = \frac{1}{312 + 15} = 0,003 \text{ с}^{-1},$$

а энергозатраты составляют

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{q_S b R_S l}{V_d} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 10^7 \cdot 0,015 \cdot 0,004 \cdot 0,624}{0,002} \approx \\ &\approx 0,062 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Финишная стадия технологического процесса изготовления детали при использовании гибридного металлообрабатывающего оборудования осуществлялась на модернизированном многоцелевом обрабатывающем центре MC 032.06 и состояла из трех переходов: предварительная (черновая) и получистовая механическая обработка, поверхностная закалка ВЭН ТВЧ, чистовое фрезерование. Станочная система была дооснащена дополнительным источником энергии, в качестве которого использовался сверхвысокочастотный генератор тиристорного типа СВЧ-10 с рабочей частотой тока 440 кГц. Для измерения и контроля рабочей частоты индукционного нагревателя использовался цифровой осциллограф Hantek DSO 1000S Series.

Исходя из габаритных размеров изделия $25 \times 160 \times 300$ мм из материала У10А, была взята заготовка в форме листа $30 \times 170 \times 310$ мм. Для базирования в станке использовалась пара специальных самоцентрирующихся тисов с сечением губок 40×100 мм. Первым этапом изготовления было формообразование присоединительного основания пуансона, которое включало в себя черновую и чистовую обработку торцевыми и концевыми фрезами с СМП из твердого сплава. Исходя из технических характеристик станка и обрабатываемого материала был подобран инструмент и рассчитаны режимы резания. Для черновых операций использовалась торцевая фреза IE21-90.11A16.040.05 диаметром 40 мм с пластинами APKT113508R-GL IA6330, предназначенными для фрезерования углеродистой и нержавеющей стали и твердых материалов. Режимы резания: $V_C = 200$ м/мин; $ap = 5$ мм; $ae = 30$ мм; $V_f = 800$ мм/мин. Этим же инструментом производилась чистовая доводка плоскости на следующих режимах: $V_C = 350$ м/мин; $ap = 0,15$ мм; $ae = 30$ мм; $V_f = 500$ мм/мин. Для формирования присоединительных пазов использовалась монолитная твердосплавная фреза диаметром 4 мм с радиусом кромки 0,2 мм и шаровая фреза диаметром 2 мм на следующих режимах: $V_C = 50$ м/мин; $ap = 0,5$ мм; $ae = 4$ мм; $V_f = 500$ мм/мин.

В процессе закали использовался индуктор петлевого типа, оснащенный ферритом марки N87 (рис. 2) [7, 14, 17, 21, 47, 61, 71–73, 75, 82–83, 87]. Индуктор установлен в переходную оправку из стеклонаполненного пластика ZX-

324 GF30 РЕЕК, способную работать в условиях повышенных температур, и надежно зафиксирован в инструментальном патроне с цанговым зажимом (рис. 6). Исследования проводились при использовании интенсивного водяного циркуляционного охлаждения индуктора (см. рис. 2).

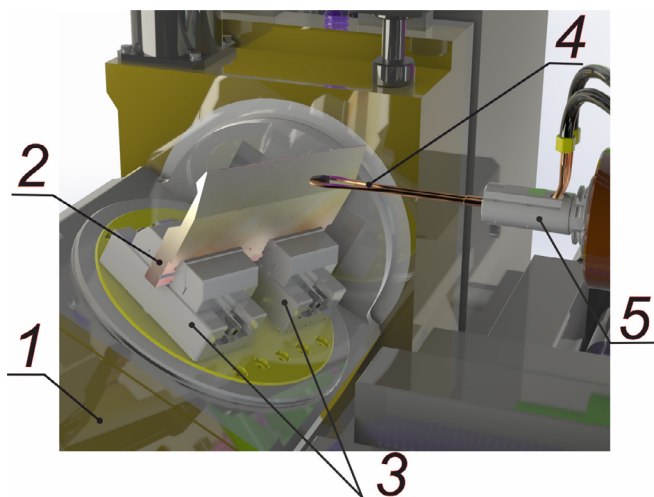


Рис. 6. Зона обработки при ВЭН ТВЧ:

1 – поворотный стол; 2 – заготовка; 3 – самоцентрирующиеся тиски; 4 – петлевой индуктор; 5 – переходная оправка

Fig. 6. Processing area with high-energy heating by high-frequency currents:

1 – turntable; 2 – workpiece; 3 – self-centering chuck; 4 – loop inductor; 5 – adapter mandrel

Чистовое фрезерование рабочего профиля производилось на следующих режимах: $V_C = 370$ м/мин; $ap = 0,05$ мм; $ae = 20$ мм; $V_f = 250$ мм/мин. Во время механической обработки использовалась универсальная смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) TECHCOOL 1000, содержащая минеральные масла.

В процессе интегральной обработки заготовки, когда нивелируются ее переуставы между механическими операциями и поверхностной термической обработкой, технологическая глубина закалки на переходе «поверхностная закалка ВЭН ТВЧ» составляет $A_T = 0,52^{+0.28}$ мм (припуск на окончательную обработку $z_{\min} = 0$). Отсутствие дополнительного установа, а также наличие того факта, что предварительная обработка выполняется на незакаленном материале, приводит к тому, что фрезерование осуществляется в более интенсивном режиме, чем при использовании стандартной технологии. Более того, применение гибридной технологии позво-

ляет интенсифицировать процесс резания заготовки при механической обработке за счет дополнительного подогрева концентрированным источником энергии. Предварительный подогрев изделия высокочастотными токами перед применением режущего инструмента снижает сопротивление при обработке и делает заготовку более податливой для формообразования. Таким образом, достигается дополнительный эффект, позволяющий усилить режимные параметры при предварительном (черновом) фрезеровании. При этом последующим переходом «поверхностная закалка ВЭН ТВЧ» за счет нагрева углеродистой инструментальной стали У10А под закалку станет возможным нивелировать опасный уровень напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки на окончательное состояние материала.

Для определения наиболее эффективных режимов поверхностной закалки в рамках использования гибридной обработки была установлена взаимосвязь между глубиной упрочнения и технологическими параметрами обработки для данной марки стали:

$$h(q_S, V_S) = a + bV_S + cq_S + dV_S^2 + eq_S^2 + fV_Sq_S + gV_S^3 + xq_S^3 + iV_Sq_S^2 + jV_S^2q_S, \quad (1)$$

где значения коэффициентов для стали У10А: $a = 0,906184$; $b = -12,343186$; $c = 1,851541 \cdot 10^{-9}$; $d = 24,621030$; $e = 4,103625 \cdot 10^{-18}$; $f = -1,571684 \times 10^{-8}$; $g = -66,067377$; $x = -4,851607 \cdot 10^{-28}$; $i = -2,040626 \cdot 10^{-17}$; $j = 6,052463 \cdot 10^{-8}$.

Результаты исследований приведены на рис. 7. Обработка экспериментальных данных была выполнена с помощью программных продуктов STATISTICA 6.0 и Table Curve 3D v 4.0. Важно отметить, что максимальная погрешность не превышает 5 %, что говорит о надежности и точности результатов. Это подтверждает достоверность исследования и позволяет принять его результаты во внимание при выработке решений.

При использовании ВЭН ТВЧ изменение геометрических параметров источника в процессе изготовления нового индуктора является сложным и затратным процессом. В связи с этим удельная мощность источника нагрева и скорость его перемещения были выбраны в качестве переменных параметров. При применении

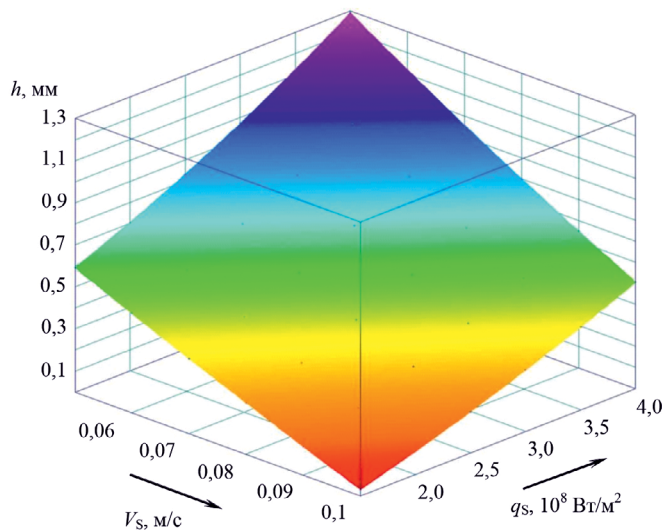


Рис. 7. Функциональная зависимость $h(q_s, V_s)$ для стали У10А

Fig. 7. Functional dependence $h(q_s, V_s)$ for U10A steel

индукционного нагрева обычно сначала определяется размер источника, а затем два других технологических параметра. Однако результаты математических и экспериментальных исследований [7, 14, 17, 21, 47, 61, 71–73, 75, 82–83, 87] показали, что полученные диапазоны режимов упрочнения не гарантируют формирования закаленного слоя без появления закалочных трещин. Основной причиной появления таких микротрещин является внутреннее напряженное состояние материала.

При поверхностной закалке особое внимание уделяется глубине упрочнения, так как это является основным параметром в процессе. Для достижения желаемого уровня твердости необходимо выбрать оптимальную марку стали. При этом воздействие на величину и распределение остаточных напряжений возможно только путем изменения размера переходной зоны.

Принимая во внимание факт, что месторасположение максимальных растягивающих напряжений является очагом разрушения детали в процессе эксплуатации, целесообразно переместить опасную зону вглубь от поверхности изделия. При этом наибольшая глубина залегания достигается, если величина переходного слоя максимальна. Однако необходимо найти равновесие, поскольку при увеличении глубины залегания также уменьшается уровень сжимающих напряжений на поверхности. Исследования показали, что оптимальный размер переходного слоя должен составлять примерно 25–33 % от

глубины упрочненного слоя. При соблюдении этого требования достигается баланс между перемещением напряжений в глубокие слои материала и снижением сжимающих напряжений на поверхности, не превышающим 6–10 %. Особенно важно обеспечить большую величину переходного слоя при закалке сталей с высоким содержанием углерода. Это позволяет эффективно контролировать механические свойства и устойчивость деталей к разрушению [7, 14, 17, 21, 47, 61, 71–73, 75, 82–83, 87, 102].

В процессе выбора режимов поверхностной закалки деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, используется дополнительный критерий – относительная величина переходной зоны, обозначаемая как $\Psi(q_s, V_s)$. Этот критерий определяется как отношение величины переходной зоны к глубине закаленного слоя.

Путем анализа экспериментальных данных была установлена соответствующая функциональная зависимость $\Psi_{U10}(q_s, V_s)$ (рис. 8), применимая к исследуемому материалу и диапазону режимов обработки:

$$\begin{aligned} \Psi_{U10}(q_s, V_s) = & k + lV_s + mq_s + \\ & + nV_s^2 + oq_s^2 + pV_sq_s + rV_s^3 + sq_s^3 + \\ & + tV_sq_s^2 + uV_s^2q_s, \end{aligned} \quad (2)$$

где $0,25 \leq \Psi_{U10}(q_s, V_s) \leq 0,33$. Значения коэффициентов функциональной зависимости для стали марки У10А: $k = 0,55499986$; $l = 6,376$; $m = -3,0969982 \cdot 10^{-9}$; $n = 2,1133193 \cdot 10^{-6}$; $o = -6,697454 \cdot 10^{-24}$; $p = -9,444857 \cdot 10^{-16}$; $r = -1,1120113 \cdot 10^{-5}$; $s = 8,2498316 \cdot 10^{-33}$; $t = 1,5500134 \cdot 10^{-24}$; $u = 1,3319075 \cdot 10^{-15}$.

Определение удельной мощности и скорости перемещения источника при поверхностной закалке осуществляется путем решения системы уравнений при заданных значениях глубины закалки и относительной величины переходной зоны:

$$\begin{cases} h_{U10}(q_s, V_s); \\ \Psi_{U10}(q_s, V_s). \end{cases}$$

Графическое решение этой задачи представлено на рис. 9. Следует отметить, что полученный диапазон режимов обработки значительно меньше по сравнению с интервалом режимов

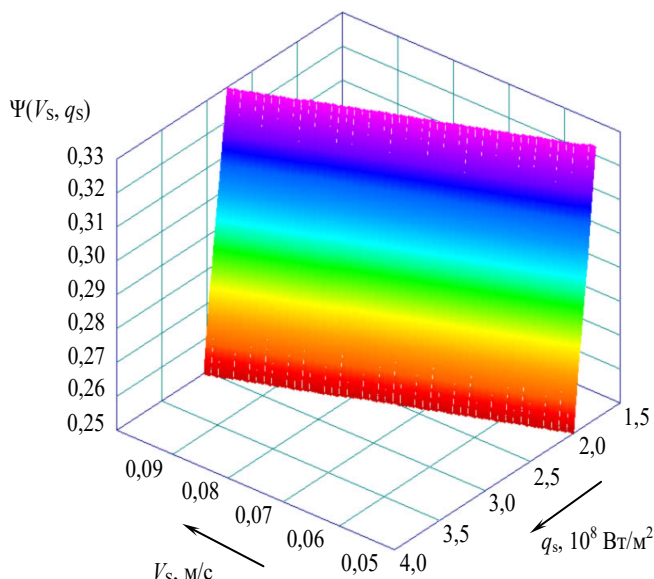


Рис. 8. Функциональная зависимость $\Psi(q_s, V_s)$ для стали У10А

Fig. 8. Functional dependence $\Psi(q_s, V_s)$ for U10A steel

для достижения только заданной глубины упрочненного слоя.

Для достижения в процессе поверхностной закалки ВЭН ТВЧ требуемой глубины упрочненного слоя $h = 0,52$ мм необходимо выбрать режимные параметры в диапазоне, ограниченном

точками А и В на кривой (рис. 9). Эти параметры включают в себя удельную мощность q_s , которая будет находиться в диапазоне от $2,09 \cdot 10^8$ до $2,49 \cdot 10^8$ Вт/м², а скорость перемещения источника V_s будет составлять от 66 до 73 мм/с. Указанные режимы обработки гарантируют достижение требуемой глубины закалки и оптимальную величину переходной зоны.

Поскольку закалка ВЭН ТВЧ выполняется за одну установку заготовки, то вспомогательное время равно 0 с. Расчет производительности и энергозатрат на переходе «поверхностная закалка ВЭН ТВЧ» выполняется с использованием следующих формул:

$$\Pi_{\text{шт}} = \frac{V_s}{L}; \quad \Theta = \frac{q_s b R_s}{\Pi_{\text{шт}}} = \frac{q_s b R_s L}{V_s},$$

где $L = 614$ мм (см. рис. 3); $b = 10$ мм (см. рис. 2).

Табл. 2 содержит результаты расчета энергозатрат и производительности для всех сочетаний режимных параметров при термоупрочнении детали.

В результате анализа можно сделать вывод о том, что применение интегральной обработки позволяет значительно увеличить производительность поверхностной закалки ВЭН ТВЧ по сравнению с существующей технологией на

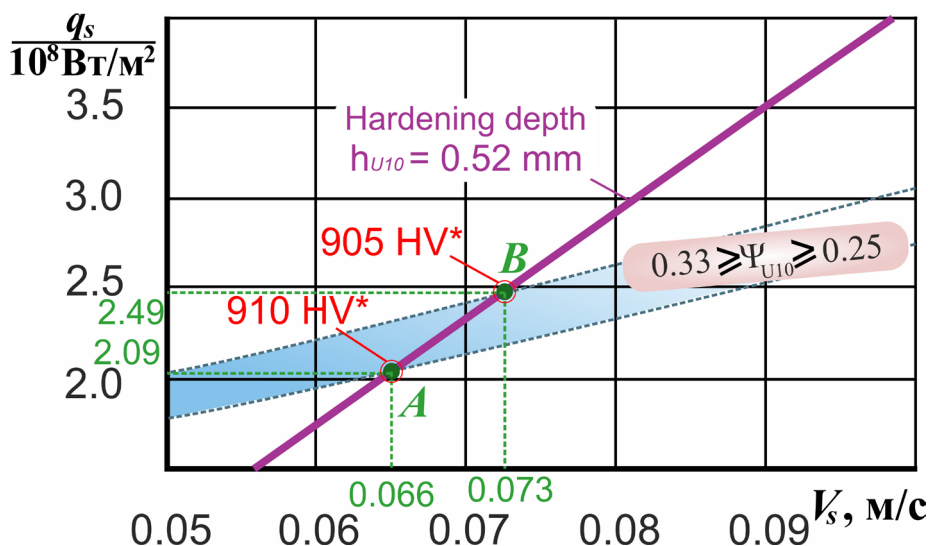


Рис. 9. Зависимость удельной мощности источника от его скорости движения при закалке ВЭН ТВЧ стали У10А на глубину 0,52 мм.

* Уровень микротвердости поверхностного слоя детали, достигнутый после перехода «поверхностная закалка ВЭН ТВЧ»

Fig. 9. The dependence of specific power of the source on its speed while HEH HFC hardening steel U10 to a depth of $h = 0.52$ mm.

* The level of microhardness of the surface layer of the part, achieved after the operation "Surface hardening by HEH HFC"

**Результаты расчета производительности и энергозатрат при интегрированной обработке
поверхностной заалки с использованием ВЭН ТВЧ**

**Calculation results of the efficiency and energy consumption in the integrated processing of surface HEN
HFC hardening**

Сталь, режим		Скорость V_s , м/с	Удельная мощность q_s , 10^8 Вт/м ²	Производительность, с ⁻¹	Энергозатраты, кВт · ч
У10А	<i>A</i>	0,066	2,09	0,108	0,011
	<i>B</i>	0,073	2,49	0,119	0,012

предприятия до 36–40 раз. Кроме того, энергозатраты сокращаются почти в шесть раз.

Результаты оптической микроскопии, измерений микротвердости и остаточных напряже-

ний представлены в виде графической и числовой информации на рис. 10. Эти результаты становятся основой для более глубокого анализа и интерпретации полученных данных.

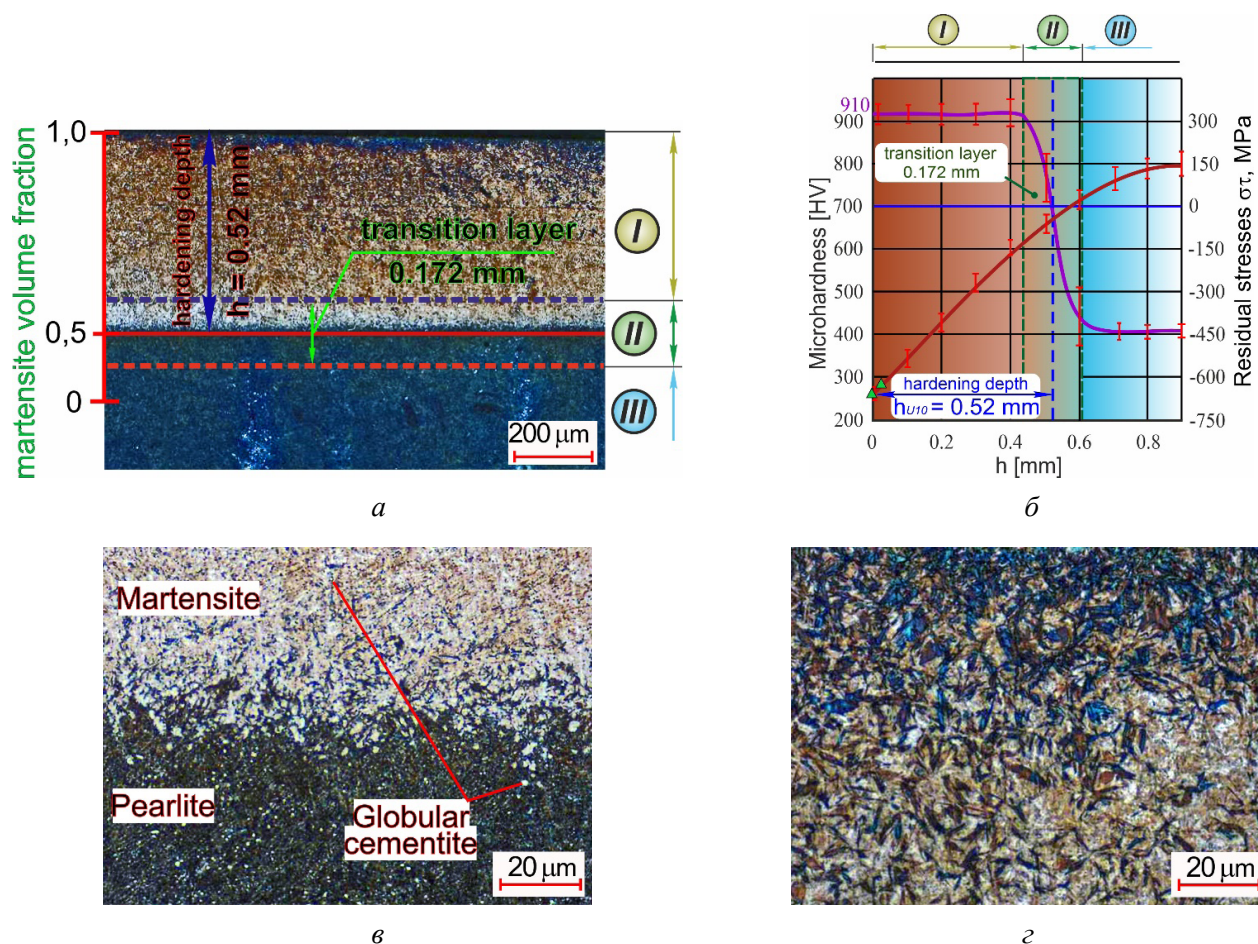


Рис. 10. Результаты экспериментов для деталей, изготовленных из стали У10А:

a – оптическая микроскопия; *б* – распределение микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое (▲ – остаточные напряжения, полученные рентгеновским методом определения); *в* – микроструктура основного металла и переходной зоны; *г* – микроструктура упрочненного слоя

Fig. 10. Experimental results for parts made of U10A steel:

a – optical microscopy; *б* – the distribution of microhardness and residual stresses in the surface layer (▲ – residual stresses obtained by X-ray determination); *в* – microstructure of base metal and transition zone; *г* – microstructure of the hardened layer

Изучая график распределения микротвердости поверхностного слоя (рис. 10, а, б), можно выделить три характерные области. Первая область, обозначенная как зона I, характеризуется стабильным средним значением микротвердости. Вторая область, или зона II, является переходной зоной. Наконец, третья область, или зона III, не претерпевает структурно-фазовых изменений. Глубину закаленного слоя определяют как расстояние от поверхности до области, содержащей 50 % мартенсита. Переходный слой представляет собой область между поверхностным слоем закаленного металла с постоянным средним значением микротвердости и зоной материала, не подвергшегося структурно-фазовым превращениям.

Основной металл представляет собой пластинчатый перлит (рис. 10, в). Кроме того, в основном металле наблюдается глобулярный цементит размерами от 1 до 5 мкм. Переходная зона, величина которой при данных режимах обработки составляет 0,172 мм (рис. 10, а, б), состоит из мартенсита (светлый), перлита (темный) и глобулярного цементита (рис. 10, в). Наличие перлита и глобулей цементита говорит о том, что температуры нагрева этого участка не превышали температуры A_{c3} и время выдержки при этой температуре было незначительно. В упрочненном слое наблюдается мартенсит с резко протравленными пластинами и остаточный аустенит (рис. 10, з). По мере удаления от основного металла количество глобулярного цементита уменьшается.

Упрочненный слой исследуемой марки стали, полученный при ВЭН ТВЧ на глубине закалки 0,52 мм, обладает микротвердостью 910 HV. Кроме того, максимальное значение остаточных напряжений сжатия на рабочей поверхности пуансона примерно равно $\sigma_{C \max} \approx -700$ МПа.

Заключение

На основании проведенных исследований разработаны рекомендации, которые направлены на модернизацию многоцелевого пятикоординатного обрабатывающего центра MC 032.06. Их исполнение позволит осуществить высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) на стандартной станочной системе и сформировать наукоемкое технологическое

оборудование с расширенными функциональными возможностями. Было экспериментально подтверждено, что внедрение предложенного гибридного станка и применение разработанных рекомендаций для установления рациональных режимов ВЭН ТВЧ в процессе интегральной обработки деталей типа «пуансон» может значительно увеличить производительность поверхностной закалки – в 36–40 раз по сравнению с используемой заводской технологией. Одновременно с этим энергозатраты сокращаются в шесть раз. Выполнение представленной работы позволило получить информацию, которая может быть использована для решения актуальной проблемы в сфере машиностроения. Эта задача связана с обеспечением высокого качества продукции, сокращением времени производственного цикла, минимизацией себестоимости выпускаемых изделий и созданием новых поверхностных характеристик обрабатываемых деталей. Таким образом, результаты работы предоставляют ценные рекомендации и подходы для решения всех этих аспектов и улучшения процесса производства в области машиностроения.

Список литературы

1. Optimization of machining parameters for green manufacturing / Y. Anand, A. Gupta, A. Abrol, Ayush Gupta, V. Kumar, S.K. Tyagi, S. Anand // *Cogent Engineering*. – 2016. – Vol. 3, iss. 1. – P. 1153292. – DOI: 10.1080/23311916.2016.1153292.
2. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools / J. Lv, R. Tang, Sh. Jia, Y. Liu // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – Vol. 112, pt. 5. – P. 3864–3874. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.040.
3. Martino J.P. Technological forecasting – An overview // *Management Science*. – 1980. – Vol. 26, N 1. – P. 28–33.
4. Рыжикова Т.Н., Боровский В.Г. Исследование стратегических перспектив модернизации станкостроения // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2017. – Т. 16, № 5 (464). – С. 835–850. – DOI: 10.24891/ea.16.5.835.
5. Ghani J.A., Rizal M., Haron C.H.C. Performance of green machining: a comparative study of turning ductile cast iron FCD700 // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – Vol. 85. – P. 289–292. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.02.029.
6. Fernando W.L.R., Karunathilake H.P., Gamage J.R. Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A



review // Cleaner Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 3. – P. 100100. – DOI: 10.1016/j.clet.2021.100100.

7. Скиба В.Ю., Иванцовский В.В. Повышение эффективности поверхностно-термического упрочнения деталей машин в условиях совмещения обрабатывающих технологий, интегрируемых на единой станочной базе // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 45–71. – DOI: 10.17212/19946309202123.34571.

8. Макаров В.М., Лукина С.В. Уникальная синергия гибридных станков // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2016. – № 8. – С. 18–25.

9. Макаров В.М. Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.

10. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

11. Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May 26–28, 2008, Tokyo, Japan / M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura, eds. – London: Springer, 2008. – 556 p. – ISBN 978-1-84800-267-8. – DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

12. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. McIntosh // CIRP Annals. – 2014. – Vol. 63, iss. 2. – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

13. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multi-arms machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.

14. Скиба В.Ю. Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-63092019-21.2-62-83.

15. Brecher C., Özdemir D. Integrative production technology: theory and applications. – [S. l.]: Springer International Publ., 2017. – 1100 p. – ISBN 978-3-319-47451-9. – ISBN 978-3-319-47452-6. – DOI: 10.1007/9783-319-47452-6.

16. Moriwaki T. Multi-functional machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57, iss. 2. – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

17. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю. Гибридное металлообрабатывающее оборудование. Технологические аспекты интеграции операций поверхностной

закалки и абразивного шлифования: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 348 с. – ISBN 9785-7782-3988-3.

18. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

19. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Vol. 50, iss. 8. – P. 663–680. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.

20. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials / K. You, G. Yan, X. Luo, M.D. Gilchrist, F. Fang // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 58. – P. 677–692. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.

21. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebe, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.

22. Борисов М.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Гибридная технология электрохимической обработки сложнопрофильных изделий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 25–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.

23. Hügel H., Wiedmaier M., Rudlaff T. Laser processing integrated into machine tools – design, applications, economy // Optical and Quantum Electronics. – 1995. – Vol. 27, iss. 12. – P. 1149–1164. – DOI: 10.1007/BF00326472.

24. Madhavulu G., Ahmed B. Hot Machining Process for improved metal removal rates in turning operations // Journal of Materials Processing Technology. – 1994. – Vol. 44. – P. 199–206. – DOI: 10.1016/0924-0136(94)90432-4.

25. Laser-assisted grinding of silicon nitride ceramics: Micro-groove preparation and removal mechanism / C. Wu, T. Zhang, W. Guo, X. Meng, Z. Ding, S.Y. Liang // Ceramics International. – 2022. – Vol. 48, iss. 21. – P. 32366–32379. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.07.180.

26. Rao T.B. Reliability analysis of the cutting tool in plasma-assisted turning and prediction of machining characteristics // Australian Journal of Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 20. – P. 1020–1034. – DOI: 10.1080/14484846.2020.1769458.

27. Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium / M. Olsson, V. Akujärvi, J.-E. Ståhl, V. Bushlya // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021. – Vol. 97. – P. 105520. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105520.

28. Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts // South African Journal of Industrial Engineering. – 2012. – Vol. 23, iss. 2. – P. 106–115.
29. Kim S.-G., Lee C.-M., Kim D.-H. Plasma-assisted machining characteristics of wire arc additive manufactured stainless steel with different deposition directions // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 3016–3027. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.130.
30. Lee Y.-H., Lee C.-M. A study on optimal machining conditions and energy efficiency in plasma assisted machining of Ti-6Al-4V // Materials. – 2019. – Vol. 12. – P. 2590. – DOI: 10.3390/ma12162590.
31. Influence of surface integrity induced by multiple machining processes upon the fatigue performance of a nickel based superalloy / Z. Liao, D. Xu, G.G. Luna, D. Axinte, G. Augustinavicius, J.A. Sarasua, A. Wretland // Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 298. – P. 117313. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117313.
32. Laser assisted milling device: A review / C.M. Lee, D.H. Kim, J.T. Baek, E.-J. Kim // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2016. – Vol. 3, iss. 2. – P. 199–208. – DOI: 10.1007/s40684-016-0027-1.
33. Wiedenmann R., Zaeh M.F. Laser-assisted milling – Process modeling and experimental validation // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2015. – Vol. 8. – P. 70–77. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.08.003.
34. Plasma assisted milling of heat-resistant superalloys / L.N. López de Lacalle, J.A. Sánchez, A. Lamikiz, A. Celaya // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2004. – Vol. 126, iss. 2. – P. 274–285. – DOI: 10.1115/1.1644548.
35. Baek J.-T., Woo W.-S., Lee C.-M. A study on the machining characteristics of induction and laser-induction assisted machining of AISI 1045 steel and Inconel 718 // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 34, pt. A. – P. 513–522. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.030.
36. High throughput hybrid laser assisted machining of sintered reaction bonded silicon nitride / G. Guerrini, A.H.A. Lutey, S.N. Melkote, A. Fortunato // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Vol. 252. – P. 628–635. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.019.
37. A review of low-temperature plasma-assisted machining: from mechanism to application / J. Liu, Y. Li, Y. Chen, Y. Zhou, S. Wang, Z. Yuan, Zh. Jin, X. Liu // Frontiers of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 18, iss. 1. – P. 18. – DOI: 10.1007/s11465-022-0734-y.
38. Anderson M.C., Shin Y.C. Laser-assisted machining of an austenitic stainless steel: P550 // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2006. – Vol. 220, iss. 12. – P. 2055–2067. – DOI: 10.1243/09544054JEM562.
39. Curvature change in laser-assisted bending of Inconel 718 / J. Widłaszewski, M. Nowak, Z. Nowak, P. Kurp // Physical Sciences Forum. – 2022. – Vol. 4, iss. 1. – P. 26. – DOI: 10.3390/psf2022004026.
40. Sun S., Harris J., Brandt M. Parametric investigation of laser-assisted machining of commercially pure titanium // Advances Engineering Materials. – 2008. – Vol. 10, iss. 6. – P. 565–572. – DOI: 10.1002/adem.200700349.
41. Mohammadi H., Patten J.A. Laser augmented diamond drilling: a new technique to drill hard and brittle materials // Procedia Manufacturing. – 2016. – Vol. 5. – P. 1337–1347. – DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.104.
42. Venkatesan K. The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of Inconel 718 using Nd:YAG laser source // Journal of Advanced Research. – 2017. – Vol. 8, iss. 4. – P. 407–423. – DOI: 10.1016/j.jare.2017.05.004.
43. Bermingham M.J., Kent D., Dargusch M.S. A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel // Wear. – 2015. – Vol. 328–329. – P. 518–530. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.03.025.
44. Study of burr width and height using ANOVA in laser hybrid micro milling of titanium alloy (Ti6Al4V) / S. Ul Hasan, S. Ali, S.H.I. Jaffery, E. Ud Din, A. Mubashir, M. Khan // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 21. – P. 4398–4408. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.051.
45. Ding H., Shen N., Shin Y.C. Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212, iss. 3. – P. 601–613. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016.
46. Laser assisted machining: a state of art review / Gurabvaiah Punugupati, Kishore Kumar Kandi, P.S.C. Bose, C.S.P. Rao // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 149. – P. 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/149/1/012014.
47. Скиба В.Ю., Иванцовский В.В. Гибридное металлообрабатывающее оборудование: повышение эффективности технологического процесса обработки деталей при интеграции поверхностной закалки и абразивного шлифования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7782-3690-5.
48. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebe // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – P. 012081. – DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.
49. Salonitis K., Chondros T., Chrysosouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process //



The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 38, iss. 1–2. – P. 48–58. DOI: 10.1007/s00170-007-1078-9.

50. *Ding H.T., Shin Y.C.* Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Vol. 50, iss. 1. – P. 106–114. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.

51. *Jeon Y., Lee C.M.* Current research trend on laser assisted machining // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2012. – Vol. 13, iss. 2. – P. 311–317. – DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.

52. *Ahn J.W., Woo W.S., Lee C.M.* A study on the energy efficiency of specific cutting energy in laser-assisted machining // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 94. – P. 748–753. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.129.

53. Hybrid-hybrid turning of micro-SiCp/AA2124 composites: A comparative study of laser-and-ultrasonic vibration-assisted machining / J. Kim, L. Zani, A. Abdul-Kadir, A. Roy, K.P. Baxevanakis, L.C.R. Jones, V.V. Silberschmidt // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 86. – P. 109–125. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.045.

54. Numerical simulation and experimental investigation of structured surface generated by 3D vibration-assisted milling / B. Lv, B. Lin, Z. Cao, W. Liu, G. Wang // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 89. – P. 371–383. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.010.

55. Wear behavior of innovative niobium carbide cutting tools in ultrasonic-assisted finishing milling / J. Witte, D. Huebler, D. Schroepfer, A. Boerner, T. Kannengiesser // Wear. – 2023. – Vol. 522. – P. 204722. – DOI: 10.1016/j.wear.2023.204722.

56. High-frequency electrical discharge assisted milling of Inconel 718 under copper-beryllium bundle electrodes / M. Xu, R. Wei, C. Li, T.J. Ko // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 85. – P. 1116–1132. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.026.

57. High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel / P. Dumitrescu, P. Koshy, J. Stenekes, M.A. Elbestawi // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2016. – Vol. 46, iss. 15. – P. 2009–2016. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.005.

58. *Kim E.-J., Lee C.-M.* Experimental study on power consumption of laser and induction assisted machining with Inconel 718 // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 59. – P. 411–420. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.064.

59. Effects of laser-assisted grinding on surface integrity of zirconia ceramic / Z. Ma, Z. Wang, X. Wang, T. Yu // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, iss. 1. – P. 921–929. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.051.

60. *Choi Y.H., Lee C.M.* A study on the machining characteristics of AISI 1045 steel and Inconel 718 with circular cone shape in induction assisted machining // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 34. – P. 463–476. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.023.

61. *Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyshev N.V.* Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions // Metals. – 2021. – Vol. 11, iss. 9. – P. 1354. – DOI: 10.3390/met11091354.

62. *Kim E.J., Lee C.M.* A study on the optimal machining parameters of the induction assisted milling with Inconel 718 // Materials. – 2019. – Vol. 12, iss. 2. – P. 233. – DOI: 10.3390/ma12020233.

63. Investigation of surface integrity in laser-assisted machining of nickel based superalloy / D. Xu, Z. Liao, D. Axinte, J.A. Sarasua, R. M'Saoubi, A. Wretland // Materials & Design. – 2020. – Vol. 194. – P. 108851. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108851.

64. *Kim J.-H., Kim E.-J., Lee C.-M.* A study on the heat affected zone and machining characteristics of difficult-to-cut materials in laser and induction assisted machining // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 57. – P. 499–508. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.013.

65. *Ha J.-H., Lee C.-M.* A study on the thermal effect by multi heat sources and machining characteristics of laser and induction assisted milling // Materials. – 2019. – Vol. 12, iss. 7. – P. 1032. – DOI: 10.3390/ma12071032.

66. *Woo W.S., Lee C.M.* A study on the optimum machining conditions and energy efficiency of a laser-assisted fillet milling // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2018. – Vol. 5, iss. 5. – P. 593–604. – DOI: 10.1007/s40684-018-0061-2.

67. *Zaeh M.F., Wiedenmann R., Daub R.* A thermal simulation model for laser-assisted milling // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 5. – P. 353–362. – DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.062.

68. Laser-assisted milling of advanced materials / C. Brecher, M. Emonts, C.-J. Rosen, J.-P. Hermani // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 599–606. – DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.076.

69. *Venkatesan K., Ramanujam R., Kuppan P.* Laser assisted machining of difficult to cut materials: research opportunities and future directions – A comprehensive review // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 97. – P. 1626–1636. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.313.

70. *Kim I.-W., Lee C.-M.* A study on the machining characteristics of specimens with spherical shape using laser-assisted machining // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 100. – P. 636–645. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.005.

71. Efficiency of hybrid equipment combining operations of surface hardening by high frequency currents

and abrasive grinding / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, N.V. Vakhrushev, K.A. Parts, G.O. Cha // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194, iss. 2. – P. 022038. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022038.

72. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing” / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeebea // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 25. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

73. Скиба В.Ю. Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин, при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2008. – 257 с.

74. Иванцовский В.В. Управление структурным и напряженным состоянием поверхностных слоев деталей машин при их упрочнении с использованием концентрированных источников нагрева и финишного шлифования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09. – Новосибирск, 2012. – 425 с.

75. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю. Эффективность объединения операций поверхностной закалки и шлифования на одном технологическом оборудовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4 (49). – С. 15–21.

76. Gao K., Qin X. Effect of feed path on the spot continual induction hardening for different curved surfaces of AISI 1045 steel // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 115. – P. 104632. – DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104632.

77. On the role of grain size on slurry erosion behavior of a novel medium-carbon, low-alloy pipeline steel after induction hardening / V. Javaheri, O. Haiko, S. Sadeghpour, K. Valtonen, J. Kömi, D. Porter // Wear. – 2021. – Vol. 476. – P. 203678. – DOI: 10.1016/j.wear.2021.203678.

78. Hybrid modeling of induction hardening processes / M.Z. Asadzadeh, P. Raninger, P. Prevedel, W. Ecker, M. Mücke // Applications in Engineering Science. – 2021. – Vol. 5. – P. 100030. – DOI: 10.1016/j.apples.2020.100030.

79. Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinder / M. Areitioaurtena, U. Segurajauregi, I. Urresti, M. Fisk, E. Ukar // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 87. – P. 545–550. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.034.

80. Hammouma C., Zeroug H. Enhanced frequency adaptation approaches for series resonant inverter control under workpiece permeability effect for induction hardening applications // Engineering

Science and Technology. – 2021. – DOI: 10.1016/j.jestch.2021.05.010.

81. In-process residual stresses regulation during grinding through induction heating with magnetic flux concentrator / F. Li, X. Li, T. Wang, Y.(K.) Rong, S.Y. Liang // International Journal of Mechanical Sciences. – 2020. – Vol. 172. – P. 105393. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105393.

82. Гибридное технологическое оборудование: к вопросу рационального выбора объектов модернизации при проведении работ, связанных с дооснащением стандартной станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии / В.Ю. Скиба, Е.А. Зверев, П.Ю. Скиба, А.Д. Черников, А.С. Попков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 45–67. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-45-67.

83. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Пушкин В.Н. Методика назначения режимов обработки при совмещении операций абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 4 (53). – С. 19–25.

84. Казанцев М.Е. Построение структурных схем станков и настройки исполнительных движений. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. – 54 с.

85. Птицын С.В., Левицкий Л.В. Структурный анализ и синтез кинематики металлорежущих станков. – Киев: УМК ВО, 1989. – 70 с.

86. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1970. – 408 с.

87. Повышение эффективности проектирования гибридного металлообрабатывающего оборудования, объединяющего механическую и поверхностно-термическую операции: отчет о научно-исследовательской работе по проекту № 9.11829.2018/11.12 / В.Ю. Скиба, В.В. Иванцовский, О.В. Нос, Е.А. Зверев, Т.Г. Мартынова, Н.В. Вахрушев, Ю.В. Ванаг, К.А. Титова, Г.О. Ча, П.Ю. Скиба. – № ГР АААА-А18-118062290029-8. – Новосибирск, 2018. – 197 с.

88. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: основы компоненттики. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.

89. Ивахненко А.Г. Повышение эффективности ранних стадий проектирования металлорежущих станков на основе структурного синтеза формообразующих систем: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1998. – 244 с.

90. Ивахненко А.Г. Концептуальное проектирование металлорежущих систем. Структурный синтез. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 1998. – 124 с.

91. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools – II – Investigation of



basic structure / M. Nakaminami, T. Tokuma, K. Matsumoto, S. Sakashita, M. Moriwaki, K. Nakamoto // International Journal of Automation Technology. – 2007. – Vol. 1, N 2. – P. 87–93. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.

92. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools – I – Analysis of requirements and specifications / M. Nakaminami, T. Tokuma, M. Moriwaki, K. Nakamoto // International Journal of Automation Technology. – 2007. – Vol. 1, N 2. – P. 78–86. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.

93. Introduction to precision machine design and error assessment / ed. by S. Mekid. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 302 p. – ISBN 0849378869. – ISBN 978-0849378867. – (Mechanical and Aerospace Engineering Series).

94. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем: монография. – Курск: Курский гос. техн. ун-т, 2010. – 151 с.

95. Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Юго-Западный государственный университет. – Курск, 2012. – 365 с.

96. Effectiveness of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts, O.Y. Erenkov, E.O. Ivakhnenko, A.V. Oleinik // Russian

Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, N 10. – P. 901–905. – DOI: 10.3103/S1068798X17100112.

97. Балакишин Б.С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969. – 560 с.

98. Иващенко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.

99. ASM Handbook. Vol. 9. Metallography and microstructures / ed. by G.F. Vander Voort. – Materials Park, Ohio, USA: ASM International Publ., 2004. – 1184 p. – ISBN 978-0-87170-706-2.

100. Totten G.E., Howes M., Inoue T. Handbook of residual stress and deformation of steel. – Materials Park, Ohio, USA: ASM International Publ., 2002. – 499 p. – ISBN 978-0-87170-729-1.

101. Springer handbook of experimental solid mechanics / W.N. Sharpe, ed. – Leipzig; New York: Springer Science and Business Media, 2008. – 1098 p. – ISBN 978-0-387-26883-5.

102. Анализ напряженно-деформированного состояния материала при высокоэнергетическом нагреве токами высокой частоты / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушкин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 90–102.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Rationalization of modes of HFC hardening of working surfaces of a plug in the conditions of hybrid processing

Vadim Skeebe^{a, *}, Nikita Vakhrushev^{1, b}, Kristina Titova^{1, c}, Aleksey Chernikov^{2, 1, d}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² LLC "GLK-Industrial Technologies", 177 Bolshevistskaya st., shop 16, Novosibirsk, 630083, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebe_vadim@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2273-5329>, vah_nikit@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-2708-3171>, krispars@yandex.ru, ^d <https://orcid.org/0009-0006-9412-7687>, aleksey.chernikov.97@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 June 2023

Revised: 14 July 2023

Accepted: 27 July 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Hybrid equipment

Multipoint machining

High energy heating

Cutting

Induction hardening

Funding

This research was funded by Russian Science Foundation project N 23-29-00945, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00945/>.

Acknowledgements

Researches were conducted at core facility of NSTU "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. The development of a cluster of hybrid metalworking systems in the machine tool industry is associated with a number of positive consequences. First, such systems help reduce production costs by optimizing the use of resources and energy. This is especially true in the face of increased competition and a trend towards savings. Secondly, hybrid systems enable the production of quality products with increased efficiency. By integrating various functions in one process equipment, metalworking processes become more efficient and precise. This reduces the amount of defective products and improves the quality of the final ones. In addition, hybrid metalworking systems have autonomous functionality, which is especially important in flexible engineering production, where rapid changeover and adaptation to various production tasks is required. Thus, hybrid metalworking systems represent an important step in the development of modern mechanical engineering, helping to reduce costs, increase efficiency and ensure high product quality. *The purpose of this work* is to increase efficiency and reduce energy consumption during surface-thermal hardening of machine parts through the use of concentrated energy sources under integral processing conditions. **Theory and Methods.** To achieve this purpose, studies were carried out on the possible structural composition and layout of hybrid equipment integrating mechanical and surface-thermal processes. When developing the theory and methods, the main provisions of the structural synthesis and components of metalworking systems were taken into account. Theoretical research is based on the application of system analysis, geometric theory of surface formation and design of metalworking machines. The experiments were carried out on a modernized multi-purpose machining center *MS 032.06*, equipped with an additional energy source, which was a microwave thyristor-type generator *SHF-10* with an operating frequency of 440 kHz, which implements high-energy heating by high-frequency currents. Structural studies were carried out using optical and scanning microscopy. The stress-strain state of the surface layer of the part was evaluated by mechanical and X-ray methods for determining residual stresses. The microhardness of the hardened surface layer of the parts was evaluated on a *Wolpert Group 402MVD* instrument. **Results and discussion.** An original method for conducting structural-kinematic analysis for pre-project studies of hybrid metalworking equipment is presented. Methodological recommendations were developed for the modernization of metal-cutting machine tools, allowing high-energy heating with high-frequency currents (*HEH HFC*) on a standard machine tool system and creating high-tech technological equipment with enhanced functionality. It has been experimentally confirmed that the introduction of the proposed hybrid machine into production in combination with recommendations for the appointment of high-frequency electric power units for integral processing of punch-type parts allows increasing the productivity of surface hardening by 36–40 times and reducing energy costs by 6 times.

For citation: Skeebe V.Yu., Vakhrushev N.V., Titova K.A., Chernikov A.D. Rationalization of modes of HFC hardening of working surfaces of a plug in the conditions of hybrid processing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 63–86. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-63-86. (In Russian).

* Corresponding author

Skeebe Vadim Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 Novosibirsk, 630073, Russian Federation
 Tel: +7 (383) 346-17-79, e-mail: skeebe_vadim@mail.ru

References

1. Anand Y., Gupta A., Abrol A., Gupta Ayush, Kumar V., Tyagi S.K., Anand S. Optimization of machining parameters for green manufacturing. *Cogent Engineering*, 2016, vol. 3, iss. 1, p. 1153292. DOI: 10.1080/23311916.2016.1153292.
2. Lv J., Tang R., Jia Sh., Liu Y. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 112, pt. 5, pp. 3864–3874. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.040.
3. Martino J.P. Technological forecasting – An overview. *Management Science*, 1980, vol. 26, no. 1, pp. 28–33.
4. Ryzhikova T.N., Borovskii V.G. Issledovanie strategicheskikh perspektiv modernizatsii stankostroeniya [Exploring the strategic perspectives for machine tool industry modernization]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*, 2017, vol. 16, no. 5, pp. 835–850. DOI: 10.24891/ea.16.5.835.
5. Ghani J.A., Rizal M., Haron C.H.C. Performance of green machining: a comparative study of turning ductile cast iron FCD700. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 85, pp. 289–292. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.02.029.
6. Fernando W.L.R., Karunathilake H.P., Gamage J.R. Strategies to reduce energy and metalworking fluid consumption for the sustainability of turning operation: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, vol. 3, p. 100100. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100100.
7. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Povyshenie effektivnosti poverkhnostno-termicheskogo uprochneniya detalei mashin v usloviyakh sovmeshcheniya obrabatyvayushchikh tekhnologii, integriruemykh na edinoi stanochnoi baze [Improving the efficiency of surfacethermal hardening of machine parts in conditions of combination of processing technologies, integrated on a single machine tool base]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 45–71. DOI: 10.17212/19946309202123.34571.
8. Makarov V.M., Lukina S.V. Unikal'naya sinergiya gibridnykh stankov [Unique synergy of hybrid machines]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2016, no. 8, pp. 18–25.
9. Makarov V.M. Kompleksirovannye tekhnologicheskie sistemy: perspektivy i problemy vnedreniya [Well integrated technological systems: prospects and problems of implementation]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2011, no. 6 (64), pp. 20–23.
10. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, p. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.
11. Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F., eds. *Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, May 26–28, 2008, Tokyo, Japan. London, Springer, 2008. 556 p. ISBN 978-1-84800-267-8. DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.
12. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63, iss. 2, pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
13. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42, iss. 1, pp. 433–436. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
14. Skeebe V.Yu. Gibridnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metalloobrabatyvayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.
15. Brecher C., Özdemir D. *Integrative production technology: theory and applications*. Springer International Publ., 2017. 1100 p. ISBN 978-3-319-47451-9. ISBN 978-3-319-47452-6. DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.
16. Moriwaki T. Multi-functional machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, iss. 2, pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
17. Ivantsivsky V.V., Skeebe V.Yu. *Gibridnoe metalloobrabatyvayushchee oborudovanie. Tekhnologicheskie aspekty integratsii operatsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment. Technological aspects of integrating the operations of surface hardening and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 348 p. ISBN 978-5-7782-3988-3.
18. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

19. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 8, pp. 663–680. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.
20. You K., Yan G., Luo X., Gilchrist M.D., Fang F. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 677–692. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.
21. Skeeba V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12. DOI: 10.1080/10426914.2014.973595
22. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Gibridnaya tekhnologiya elektrokhimicheskoi obrabotki slozhnopofil'nykh izdelii [Hybrid technology of electrochemical processing of complex profiles]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 25–34. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.
23. Hügel H., Wiedmaier M., Rudlaff T. Laser processing integrated into machine tools – design, applications, economy. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, vol. 27, iss. 12, pp. 1149–1164. DOI: 10.1007/BF00326472.
24. Madhavulu G., Ahmed B. Hot Machining Process for improved metal removal rates in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, vol. 44, pp. 199–206. DOI: 10.1016/0924-0136(94)90432-4.
25. Wu C., Zhang T., Guo W., Meng X., Ding Z., Liang S.Y. Laser-assisted grinding of silicon nitride ceramics: Micro-groove preparation and removal mechanism. *Ceramics International*, 2022, vol. 48, iss. 21, pp. 32366–32379. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.07.180.
26. Rao T.B. Reliability analysis of the cutting tool in plasma-assisted turning and prediction of machining characteristics. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, pp. 1020–1034. DOI: 10.1080/14484846.2020.1769458.
27. Olsson M., Akujärvi V., Ståhl J.-E., Bushlya V. Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 97, p. 105520. DOI: 10.1016/j.jrmhm.2021.105520.
28. Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2012, vol. 23, iss. 2, pp. 106–115.
29. Kim S.-G., Lee C.-M., Kim D.-H. Plasma-assisted machining characteristics of wire arc additive manufactured stainless steel with different deposition directions. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 3016–3027. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.130.
30. Lee Y.-H., Lee C.-M. A study on optimal machining conditions and energy efficiency in plasma assisted machining of Ti-6Al-4V. *Materials*, 2019, vol. 12, p. 2590. DOI: 10.3390/ma12162590.
31. Liao Z., Xu D., Luna G.G., Axinte D., Augustinavicius G., Sarasua J.A., Wretland A. Influence of surface integrity induced by multiple machining processes upon the fatigue performance of a nickel based superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, vol. 298, p. 117313. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117313.
32. Lee C.M., Kim D.H., Baek J.T., Kim E.-J. Laser assisted milling device: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 2016, vol. 3, iss. 2, pp. 199–208. DOI: 10.1007/s40684-016-0027-1.
33. Wiedenmann R., Zaeh M.F. Laser-assisted milling – Process modeling and experimental validation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015, vol. 8, pp. 70–77. DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.08.003.
34. López de Lacalle L.N., Sánchez J.A., Lamikiz A., Celaya A. Plasma assisted milling of heat-resistant superalloys. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, vol. 126, iss. 2, pp. 274–285. DOI: 10.1115/1.1644548.
35. Baek J.-T., Woo W.-S., Lee C.-M. A study on the machining characteristics of induction and laser-induction assisted machining of AISI 1045 steel and Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 34, pt. A, pp. 513–522. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.030.
36. Guerrini G., Lutey A.H.A., Melkote S.N., Fortunato A. High throughput hybrid laser assisted machining of sintered reaction bonded silicon nitride. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 252, pp. 628–635. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.019.
37. Liu J., Li Y., Chen Y., Zhou Y., Wang S., Yuan Z., Jin Zh., Liu X. A review of low-temperature plasma-assisted machining: from mechanism to application. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2023, vol. 18, iss. 1, p. 18. DOI: 10.1007/s11465-022-0734-y.
38. Anderson M.C., Shin Y.C. Laser-assisted machining of an austenitic stainless steel: P550. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2006, vol. 220, iss. 12, pp. 2055–2067. DOI: 10.1243/09544054JEM562.



39. Widłaszewski J., Nowak M., Nowak Z., Kurp P. Curvature change in laser-assisted bending of Inconel 718. *Physical Sciences Forum*, 2022, vol. 4. iss. 1, p. 26. DOI: 10.3390/psf2022004026.
40. Sun S., Harris J., Brandt M. Parametric investigation of laser-assisted machining of commercially pure titanium. *Advances Engineering Materials*, 2008, vol 10, iss. 6, pp. 565–572. DOI: 10.1002/adem.200700349.
41. Mohammadi H., Patten J.A. Laser augmented diamond drilling: a new technique to drill hard and brittle materials. *Procedia Manufacturing*, 2016, vol. 5, pp. 1337–1347. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.104.
42. Venkatesan K. The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of Inconel 718 using Nd:YAG laser source. *Journal of Advanced Research*, 2017, vol. 8, iss. 4, pp. 407–423. DOI: 10.1016/j.jare.2017.05.004.
43. Bermingham M.J., Kent D., Dargusch M.S. A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel. *Wear*, 2015, vol. 328–329, pp. 518–530. DOI: 10.1016/j.wear.2015.03.025.
44. Ul Hasan S., Ali S., Jaffery S.H.I., Ud Din E., Mubashir A., Khan M. Study of burr width and height using ANOVA in laser hybrid micro milling of titanium alloy (Ti6Al4V). *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 4398–4408. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.051.
45. Ding H., Shen N., Shin Y.C. Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, iss. 3, pp. 601–613. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016.
46. Gurabvaiah Punugupati, Kishore Kumar Kandi, Bose P.S.C., Rao C.S.P. Laser assisted machining: a state of art review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 149, p. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/149/1/012014.
47. Skeebe V.Yu., Ivantsivsky V.V. Gibrinnoe metalloobrabatyvayushchee oborudovanie: povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei pri integratsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya [Hybrid metal working equipment: improving the effectiveness of the details processing under the integration of surface quenching and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 312 p. ISBN 978-5-77823690-5.
48. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 142, p. 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.
49. Salonitis K., Chondros T., Chryssolouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 38, iss. 1–2, pp. 48–58. DOI: 10.1007/s00170-007-1078-9.
50. Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 1, pp. 106–114. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.
51. Jeon Y., Lee C.M. Current research trend on laser assisted machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, vol. 13, iss. 2, pp. 311–317. DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.
52. Ahn J.W., Woo W.S., Lee C.M. A study on the energy efficiency of specific cutting energy in laser-assisted machining. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 748–753. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.129.
53. Kim J., Zani L., Abdul-Kadir A., Roy A., Baxevanakis K.P., Jones L.C.R., Silberschmidt V.V. Hybrid-hybrid turning of micro-SiCp/AA2124 composites: A comparative study of laser-and-ultrasonic vibration-assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 86, pp. 109–125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.045.
54. Lv B., Lin B., Cao Z., Liu W., Wang G. Numerical simulation and experimental investigation of structured surface generated by 3D vibration-assisted milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 89, pp. 371–383. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.010.
55. Witte J., Huebler D., Schroepfer D., Boerner A., Kannengiesser T. Wear behavior of innovative niobium carbide cutting tools in ultrasonic-assisted finishing milling. *Wear*, 2023, vol. 522, p. 204722. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204722.
56. Xu M., Wei R., Li C., Ko T.J. High-frequency electrical discharge assisted milling of Inconel 718 under copper-beryllium bundle electrodes. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 85, pp. 1116–1132. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.026.
57. Dumitrescu P., Koshy P., Stenekes J., Elbestawi M.A. High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 46, iss. 15, pp. 2009–2016. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.005.

58. Kim E.-J., Lee C.-M. Experimental study on power consumption of laser and induction assisted machining with Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 59, pp. 411–420. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.064.
59. Ma Z., Wang Z., Wang X., Yu T. Effects of laser-assisted grinding on surface integrity of zirconia ceramic. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, iss. 1, pp. 921–929. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.051.
60. Choi Y.H., Lee C.M. A study on the machining characteristics of AISI 1045 steel and Inconel 718 with circular cone shape in induction assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 34, pp. 463–476. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.023.
61. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyshev N.V. Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 9, p. 1354. DOI: 10.3390/met11091354.
62. Kim E.J., Lee C.M. A study on the optimal machining parameters of the induction assisted milling with Inconel 718. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 2, p. 233. DOI: 10.3390/ma12020233.
63. Xu D., Liao Z., Axinte D., Sarasua J.A., M'Saoubi R., Wretland A. Investigation of surface integrity in laser-assisted machining of nickel based superalloy. *Materials & Design*, 2020, vol. 194, p. 108851. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108851.
64. Kim J.-H., Kim E.-J., Lee C.-M. A study on the heat affected zone and machining characteristics of difficult-to-cut materials in laser and induction assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 499–508. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.
65. Ha J.-H., Lee C.-M. A study on the thermal effect by multi heat sources and machining characteristics of laser and induction assisted milling. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 7, p. 1032. DOI: 10.3390/ma12071032.
66. Woo W.S., Lee C.M. A study on the optimum machining conditions and energy efficiency of a laser-assisted fillet milling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2018, vol. 5, iss. 5, pp. 593–604. DOI: 10.1007/s40684-018-0061-2.
67. Zaeh M.F., Wiedenmann R., Daub R. A thermal simulation model for laser-assisted milling. *Physics Procedia*, 2010, vol. 5, pp. 353–362. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.062.
68. Brecher C., Emonts M., Rosen C.-J., Hermani J.-P. Laser-assisted milling of advanced materials. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.076.
69. Venkatesan K., Ramanujam R., Kuppan P. Laser assisted machining of difficult to cut materials: research opportunities and future directions – A comprehensive review. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97, pp. 1626–1636. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.313.
70. Kim I.-W., Lee C.-M. A study on the machining characteristics of specimens with spherical shape using laser-assisted machining. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 100, pp. 636–645. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.005.
71. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Vakhrushev N.V., Parts K.A., Cha G.O. Efficiency of hybrid equipment combining operations of surface hardening by high frequency currents and abrasive grinding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, iss. 2, p. 022038. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022038.
72. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeebe P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 25, p. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.
73. Skeebe V.Yu. *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin, pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.
74. Ivancivsky V.V. *Upravlenie strukturnym i napryazhennym sostoyaniem poverkhnostnykh sloev detalei mashin pri ikh uprochnenii s ispol'zovaniem kontsentrirrovannykh istochnikov nagreva i finishnogo shlifovaniya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Control of structural and stress state of the surface layers of machine parts during their hardening using concentrated sources of heat and abrasive finishing. Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2012. 425 p.
75. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu. Effektivnost' ob"edineniya operatsii poverkhnostnoi zakalki i shlifovaniya na odnom tekhnologicheskom oborudovanii [Integration effectiveness of operations of surface hardening and grinding on a single technology equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2010, no. 4, pp. 15–21.
76. Gao K., Qin X. Effect of feed path on the spot continual induction hardening for different curved surfaces of AISI 1045 steel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 115, p. 104632. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104632.



77. Javaheri V., Haiko O., Sadeghpour S., Valtonen K., Kömi J., Porter D. On the role of grain size on slurry erosion behavior of a novel medium-carbon, low-alloy pipeline steel after induction hardening. *Wear*, 2021, vol. 476, p. 203678. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203678.

78. Asadzadeh M.Z., Raninger P., Prevedel P., Ecker W., Mücke M. Hybrid modeling of induction hardening processes. *Applications in Engineering Science*, 2021, vol. 5, p. 100030. DOI: 10.1016/j.apples.2020.100030.

79. Areitioaurtena M., Segurajauregi U., Urresti I., Fisk M., Ukar E. Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinder. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 87, pp. 545–550. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.034.

80. Hammouma C., Zeroug H. Enhanced frequency adaptation approaches for series resonant inverter control under workpiece permeability effect for induction hardening applications. *Engineering Science and Technology*, 2021. DOI: 10.1016/j.jestech.2021.05.010.

81. Li F., Li X., Wang T., Rong Y.(K.), Liang S.Y. In-process residual stresses regulation during grinding through induction heating with magnetic flux concentrator. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, vol. 172, p. 105393. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105393.

82. Skeebe V.Yu., Zverev E.A., Skeebe P.Yu., Chernikov A.D., Popkov A.S. Gibrinnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: k voprosu ratsional'nogo vybora ob'ektov modernizatsii pri provedenii rabot, svyazannykh s doosnashcheniem standartnoi stanochnoi sistemy dopolnitel'nym kontsentrirovannym istochnikom energii [Hybrid technological equipment: on the issue of a rational choice of objects of modernization when carrying out work related to retrofitting a standard machine tool system with an additional concentrated energy source]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 45–67. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-45-67.

83. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Pushnin V.N. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki pri sovmeshchenii operatsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh [Methods of appointment processing conditions when combining the operations of abrasive grinding and surface induction hardening]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4, pp. 19–25.

84. Kazantsev M.E. *Postroenie strukturnykh skhem stankov i nastroiки ispolnitel'nykh dvizhenii* [Construction of block diagrams of machine tools and adjustment of executive movements]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1997. 54 p.

85. Ptitsyn S.V., Levitskii L.V. *Strukturnyi analiz i sintez kinematiki metallovezhushchikh stankov* [Structural analysis and kinematics synthesis of machine tools]. Kiev, UMK Publ., 1989. 70 p.

86. Fedotenok A.A. *Kinematicheskaya struktura metallovezhushchikh stankov* [Kinematic structure of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 408 p.

87. Skeebe V.Yu., Ivantsivsky V.V., Nos O.V., Zverev E.A., Martynova T.G., Vakhrushev N.V., Vanag Yu.V., Titova K.A., Cha G.O., Skiba P.Yu. *Povyshenie effektivnosti proektirovaniya gibridnogo metalloobrabatyvayushchego oborudovaniya, ob"edinyayushchego mekhanicheskuyu i poverkhnostno-termicheskuyu operatsii* [Improving the efficiency of the conceptual design of the integrated metal-cutting equipment, combining mechanical and surface thermal operation]. Report on the research work of the project N 9.11829.2018/11.12. State registration no. AAAA-B19-219020690026-1, 2018. 197 p.

88. Vragov Yu.D. *Analiz komponentov metallovezhushchikh stankov (Osnovy komponentiki)* [Analysis of the layout of machine tools. The basics of compositing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 208 p.

89. Ivakhnenko A.G. *Povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya metallovezhushchikh stankov na osnove strukturnogo sinteza formoobrazuyushchikh sistem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the early stages of designing machine tools based on the structural synthesis of shaping systems. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 1998. 244 p.

90. Ivakhnenko A.G. *Kontseptual'noe proektirovanie metallovezhushchikh sistem. Strukturnyi sintez* [Conceptual design of metal-cutting systems. Structural synthesis]. Khabarovsk, KhGTU Publ., 1998. 124 p.

91. Nakaminami M., Tokuma T., Matsumoto K., Sakashita S., Moriwaki T., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools – II – Investigation of basic structure. *International Journal of Automation Technology*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 87–93. DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.

92. Nakaminami M., Tokuma T., Moriwaki M., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools – I – Analysis of requirements and specifications. *International Journal of Automation Technology*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 78–86. DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.

93. Mekid S., ed. *Introduction to precision machine design and error assessment. Mechanical and Aerospace Engineering Series*. Boca Raton, CRC Press, 2008. 302 p. ISBN 0849378869. ISBN 978-0849378867.

94. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. *Strukturno-parametricheskii sintez tekhnologicheskikh sistem* [Structural-parametric synthesis of technological systems]. Kursk, KurskSTU Publ., 2010. 151 p.

95. Kuts V.V. *Metodologiya predproektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallovezhushchikh sistem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methodology of pre-design studies of specialized metal-cutting systems. Dr. eng. sci. diss.]. Kursk, 2012. 365 p.
96. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Erenkov O.Y., Ivakhnenko E.O., Oleinik A.V. Effectiveness of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 10, pp. 901–905. DOI: 10.3103/S1068798X17100112.
97. Balakshin B.S. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Fundamentals of mechanical engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 560 p.
98. Ivashchenko I.A. *Tekhnologicheskie razmernye raschety i sposoby ikh avtomatizatsii* [Technological dimensional calculations and methods of their automation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 222 p.
99. Vander Voort G.F., ed. *ASM Handbook*. Vol. 9. *Metallography and microstructures*. Materials Park, Ohio, USA, ASM International Publ., 2004. 1184 p. ISBN 978-0-87170-706-2.
100. Totten G.E., Howes M., Inoue T. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, Ohio, USA, ASM International Publ., 2002. 499 p. ISBN 978-0-87170-729-1.
101. Sharpe W.N., ed. *Springer handbook of experimental solid mechanics*. Leipzig, New York, Springer Science and Business Media, 2008. 1098 p. ISBN 978-0-387-26883-5.
102. Skeebe V.Yu., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya materiala pri vysokoenergeticheskom nagreve tokami vysokoi chastoty [Analysis of the stress-strain state of the material under high-energy heating by high frequency currents]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 90–102.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).