



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





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



Повышение эффективности поверхностно-термического упрочнения деталей машин в условиях совмещения обрабатывающих технологий, интегрируемых на единой станочной базе

Вадим Скиба ^{a, *}, Владимир Иванцовский ^b

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

^a  <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  skeeba_vadim@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-9244-225X>,  ivancivskij@corp.nstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.785(787): 621.9.06(07)

История статьи:

Поступила: 14 мая 2021
 Рецензирование: 14 июня 2021
 Принята к печати: 07 августа 2021
 Доступно онлайн: 15 сентября 2021

Ключевые слова:

Гибридное оборудование
 Высокоэнергетический нагрев
 Механическая обработка
 Индукционная закалка
 Концептуальное проектирование

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 20-48-540016.

Благодарности:

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. В обрабатывающей промышленности наблюдается особый интерес к разработке нового типа технологического оборудования, позволяющего реализовать методы модифицирования поверхностных слоев деталей путем их обработки источниками концентрированной энергии. Совмещение двух обрабатывающих технологий (механической и поверхностно-термической операции) в условиях интегрального оборудования позволяет нивелировать недостатки монотехнологий и получить новые эффекты, недостижимые при использовании технологий по отдельности. Применения гибридных станков в совокупности с разработанными технологическими рекомендациями позволит достичь многократного роста технико-экономической эффективности производства, ресурсо- и энергосбережения, что, в свою очередь, будет способствовать повышению конкурентоспособности выпускаемой продукции и обновлению технологического уклада. **Цель работы:** повышение производительности и снижение энергозатрат при поверхностно-термическом упрочнении деталей машин посредством воздействия концентрированными источниками энергии в условиях интегральной обработки. **Теория и методы.** Исследования возможного структурного состава и компоновки гибридного оборудования при интеграции механических и поверхностно-термических процессов производились с учетом основных положений структурного синтеза и компонентки металлообрабатывающих систем. Теоретические исследования выполнены с использованием основных положений системного анализа, геометрической теории формирования поверхностей, конструирования металлообрабатывающих станков, методов конечных элементов, математического и компьютерного моделирования. Математическое моделирование тепловых полей и структурно-фазовых превращений при ВЭН ТВЧ осуществлялось в программных комплексах ANSYS и SYSWELD, использующих численные методы решения дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности (уравнение Фурье), диффузии углерода (2-й закон Фика) и упругопластического поведения материала. Верификация результатов моделирования осуществлялась проведением натурных экспериментов с применением оптической и растровой микроскопии; механического и рентгеновского методов определения остаточных напряжений. В исследовании для одновременного измерения отклонений формы, волнистости и шероховатости поверхности применяли профилограф-профилометры *Uone JD520* и *Form Talysurf Series 2*. Оценка топографии поверхности производили на лазерном профилографе-профилометре *Zygo New View 7300*. Микротвердость упрочненного поверхностного слоя деталей 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, выполнение которых позволит реализовать высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) на стандартной станочной системе и обеспечить формирование наукоемкого технологического оборудования с расширенными функциональными возможностями. Предложен единый интегральный параметр температурно-временного воздействия на конструкционный материал при назначении режимов упрочнения концентрированными источниками нагрева, гарантирующих требуемый комплекс показателей качества поверхностного слоя деталей машин, при обеспечении энергоэффективности и производительности обработки в целом. Экспериментально подтверждено, что внедрение в производство предлагаемого гибридного станка в совокупности с разработанными рекомендациями по назначению режимов ВЭН ТВЧ в условиях интегральной обработки детали типа «Втулка плунжерная» по отношению к заводской технологии позволяет повысить производительность поверхностной закалки в 3,5...4,1 раза и снизить энергозатраты в 9,5...11,3 раза.

Для цитирования: 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: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-45-71.

*Адрес для переписки

Скиба Вадим Юрьевич, к.т.н., доцент
 Новосибирский государственный технический университет,
 пр. К. Маркса, 20,
 г. Новосибирск, 630073, Россия
 Тел.: 8 (383) 346-17-79, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Введение

В эпоху глобализации и высокой конкурентоспособности крайне важно, чтобы современное машиностроение работало над сокращением производственных затрат и одновременно обеспечивало выпуск качественной продукции с максимальной производительностью [1–20]. В связи с этим в обрабатывающей промышленности отчетливо наблюдается особый интерес к разработке нового типа технологического оборудования, позволяющего реализовать методы модифицирования поверхностных слоев деталей путем их обработки источниками концентрированной энергии [21–25]. Локальное и сверхскоростное тепловое воздействие создает возможность получения более высоких значений твердости, прочности, вязкости за счет образования на поверхности деталей высокодисперсной метастабильной структуры namного с более высокой плотностью дислокаций по сравнению с объемной обработкой и традиционными способами поверхностного упрочнения [17, 21–23, 26–31].

Развитие технологии высокочастотного нагрева, связанное с использованием радиочастот, с работами по миниатюризации индукторов и оснащению их ферритовыми магнитопроводами, привело к появлению нового метода – высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ), который в данный момент представляет особый интерес с точки зрения упрочнения конструкционных сталей [26–28, 32–36]. С помощью этого метода возможна реализация технологического процесса закалки с удельными мощностями нагрева порядка 400 МВт/м^2 , что с успехом позволяет конкурировать с другими концентрированными источниками (лазер, электронный луч) при упрочнении материала без оплавления (рис. 1). Необходимо отметить, что обеспечение требуемого постоянного зазора ($\delta = 0,1 \dots 0,2 \text{ мм}$) между индуктором и обрабатываемой деталью, который является необходимым условием реализации ВЭН ТВЧ, стано-

вится возможным только лишь при совмещении двух обрабатывающих технологий – механической и поверхностно-термической операций – на единой станочной базе [20, 27, 28, 37]. Поскольку разработка нового станочного оборудования требует большого объема финансовых и трудовых ресурсов, нами предлагается модернизация стандартных металлорежущих станков путем их дооснащения дополнительным концентрированным источником энергии, в качестве которого можно использовать генератор ТВЧ. С учетом современного уровня развития микропроцессорной техники в области высокочастотных промышленных установок тиристорного типа, а также критерия удобоваримого встраивания в стандартную станочную систему в область наших интересов будут входить высокочастотные генераторы типа СВЧ. При этом становится актуальной задача разработки новых методик назначения режимов обработки, рассматривающих объединяемые операции технологического процесса не изолированно, а во взаимосвязи и позволяющих гарантированно получать детали с заранее заданной точностью и физико-механическими свойствами их рабочих поверхностей [27, 28].

Протекание фазовых превращений, а следовательно, получаемая структура и глубина закалки, а также размер зерна аустенита зависят от интегрального температурно-временного действия нагрева на структуру стали и поэтому также обуславливаются формой термической кривой. Использование в качестве основных параметров назначения режимов поверхностной закалки средней скорости и максимальной температуры нагрева достаточно приблизительно

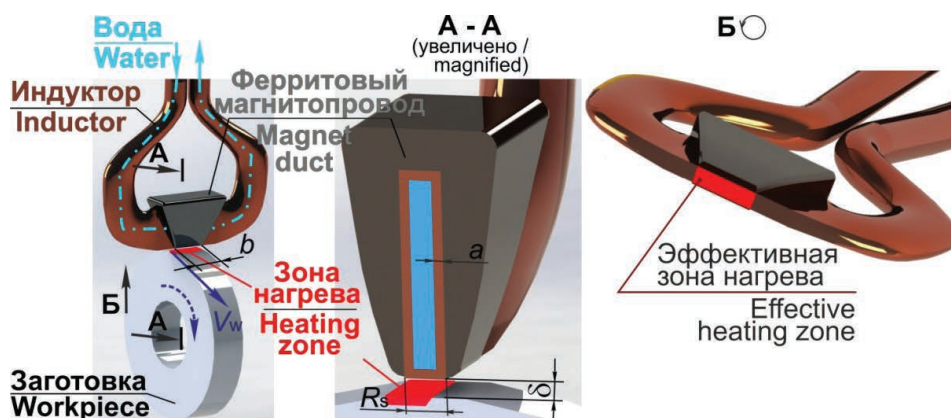


Рис. 1. Схема обработки при ВЭН ТВЧ

Fig. 1. The scheme of HEH HFC processing

характеризуют температурно-временные условия фазовых превращений при аустенитизации стали [28, 38–40]. Кроме перечисленных параметров необходимо учитывать и среднюю скорость охлаждения, и время нахождения материала в интервале температур фазовых превращений. Следовательно, режимы обработки следует назначать таким образом, чтобы обеспечить в поверхностных слоях материала необходимые термические циклы с заданными параметрами [27, 28]. При этом, как было показано в исследованиях [27, 41], установить однозначную связь численных значений этих параметров с режимами обработки и характеристиками качества упрочненного слоя не представляется возможным. Однако очевидно, что численные значения параметров термических циклов определяются величиной передаваемой энергии и характером ее распределения в материале.

В связи с этим и на основании работ [41, 42] предлагается использовать в качестве основного параметра назначения режимов поверхностной закалки интегральную температурно-временную характеристику S , объединяющую в себе все перечисленные параметры термических циклов [28, 43–45]. Процесс образования аустенита будет протекать в период времени $\tau_b = \tau_3 - \tau_1$ (рис. 2) независимо от того, имеет ли термическая кривая восходящий или нисходящий характер в данный период времени. Это значит, что суммарное время τ_b и температуры, при которых происходит процесс аустенитизации, можно охарактеризовать величиной площади (S_{ABC}), ограниченной сверху кривой нагрева, а снизу – прямой, соответствующей температуре A_{C1}

$$S = \int_{\tau_1}^{\tau_3} T(\tau) d\tau - A_{C1}(\tau_3 - \tau_1). \quad (1)$$

Физический смысл этой характеристики становится понятным из зависимости

$$S = QR_T,$$

где Q – энергия, Дж; R_T – термическое сопротивление материала, °C с/Дж.

Термическое сопротивление металла – это способность материала противодействовать переносу тепла. В данном случае мы рассматриваем металл, разогретый выше температуры A_{C1} . В этом случае численное значение термического

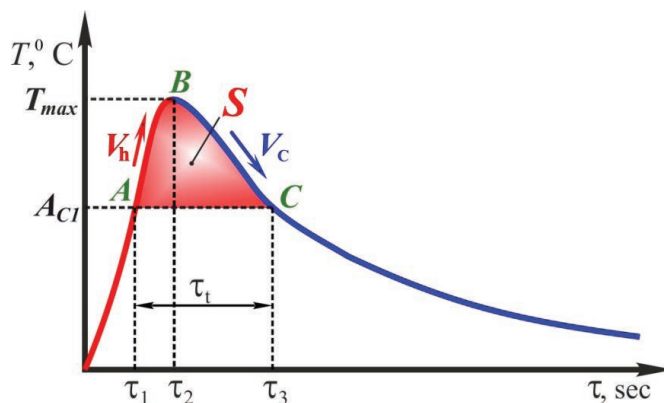


Рис. 2. Кинетическая кривая нагрева и охлаждения стали в процессе закалки

Fig. 2. Kinetic curve of steel heating and cooling during quenching

сопротивления металла будет зависеть не только от коэффициента теплопроводности, но и от структурно-фазовых переходов, которые в основном происходят в данном диапазоне температур эндотермически с поглощением теплоты. Иными словами, эта характеристика косвенным образом определяет величину энергии, передаваемую в материал и затрачиваемую на структурно-фазовые превращения. Она может быть легко рассчитана по зависимости (1) в процессе моделирования температурных полей в материале [28].

На основании вышеизложенного для разработки методики назначения режимов поверхностной закалки в условиях гибридной обработки необходимо установить взаимосвязь численных значений интегральной температурно-временной характеристики с режимами обработки, с одной стороны, и с глубиной упрочнения – с другой. Решение этой задачи осуществляется путем совместного моделирования температурных полей и структурно-фазовых превращений в материале [27, 28, 39, 44, 45].

В связи с тем что вопросы разработки новых гибридных станочных систем относятся к критическим производственным и промышленным технологиям, в литературе наблюдается нехватка экспериментальных работ, направленных на анализ эффективности их проектирования и внедрения.

Целью работы является повышение производительности и снижение энергозатрат при поверхностно-термическом упрочнении деталей машин посредством воздействия концентрированными источниками энергии в условиях интегральной обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Предложить методику структурного анализа, позволяющую эффективно выполнять предпроектные исследования при разработке гибридного металлообрабатывающего оборудования и доказать возможность встраивания источника концентрированной энергии в стандартную станочную систему.

2. Установить взаимосвязь численных значений режимных параметров ВЭН ТВЧ на характеристики качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Разработать методику назначения режимов высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты в условиях интегрированной обработки.

3. Промышленно апробировать комплекс оборудования, реализующего технологию ВЭН ТВЧ, доказывающую эффективность ее внедрения в производство.

Методика экспериментального исследования

Для определения исполнительных движений гибридной металлообрабатывающей системы (ГМС) и требуемого количества их настраиваемых параметров использовались основные положения структурно-кинематического синтеза металлорежущих станков [37, 46, 47]. Исследования возможного структурного состава и компоновки ГМС при интеграции механических и поверхностно-термических процессов производились с учетом основных положений структурного синтеза и компонетики металлообрабатывающих систем, представленных в работах [37, 48–56].

Для решения задачи определения эксплуатационных нагрузок гибридной металлообрабатывающей системы использовалась универсальная методика обоснования технических характери-

стик комплексированного станочного оборудования на базе математического моделирования условий его эксплуатации [57, 58].

Материалы и методы натурных экспериментов

В качестве образцов для натурных экспериментов была выбрана плунжерная втулка (рис. 3), изготавливаемая из стали 45 и У8А (табл. 1). Определение состава исходного материала происходило на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 3460.

Финишная стадия заводского технологического процесса изготовления детали состояла из следующих операций: точение (токарно-винторезный станок модели 16К20); закалка ТВЧ (промышленный ламповый генератор марки ВЧГ 6-60/0.44 с рабочей частотой тока 440 кГц); шлифование (круглошлифовальный станок модели 3М151В). Финишная механическая операция осуществляется по схеме врезного шлифования. При этом цикл обработки разбит на три этапа:

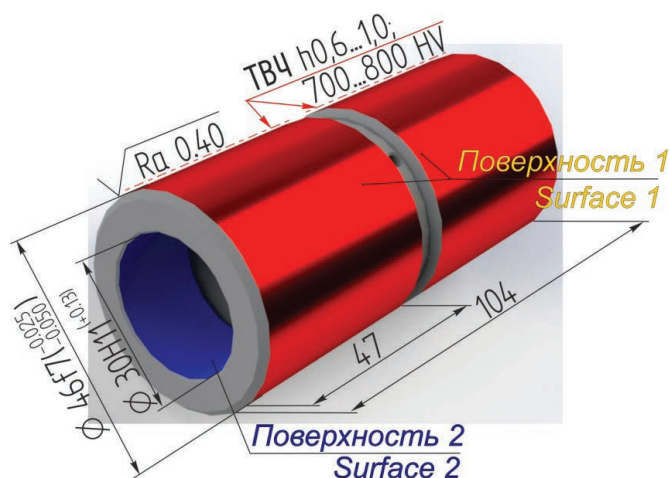


Рис. 3. Втулка плунжерная

Fig. 3. Plunger bushing

Таблица 1

Table 1

Химический состав исходного материала

Chemical compositions of initial material

Сталь / Steel	Массовая доля элемента, % Elements by weight, [%]							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
45	0,44	0,23	0,61	0,013	0,019	0,11	0,15	0,17
У8А	0,80	0,21	0,21	0,017	0,022	0,11	0,15	0,18

предварительное шлифование, окончательное и выхаживание. В связи с тем что осуществляется обработка упрочненной поверхности и во избежание изменения свойств поверхностного слоя шлифование осуществляется на «мягких» режимах. Предварительное шлифование осуществляется на режимах: величина снимаемого припуска $t = 0,2$ мм, скорость заготовки $V_3 = 30$ м/мин, радиальная подача $S_p = 0,004$ мм/об. Окончательное шлифование – $t = 0,1$ мм, $V_3 = 30$ м/мин, $S_p = 0,001$ мм/об. Время выхаживания – $\tau_b = 10$ с.

Финишная стадия технологического процесса изготовления детали при использовании гибридного металлообрабатывающего оборудования осуществлялась на модернизированном токарно-винторезном станке модели УТ16ПМ и состояла из трех переходов: точение, поверхностная закалка ВЭН ТВЧ, алмазное выравнивание. 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 модели Hantek DSO 1000S Series.

Черновое точение осуществлялось проходным резцом, оснащенным сменными многогранными пластинами (СМП) (материал режущей пластины Т15К6), на следующих режимах: $V_d = 90$ м мин⁻¹; $S_o = 0,35$ мм/об.; $t = 1$ мм. При поверхностной закалке использовался индуктор петлевого типа, оснащенный ферритом марки N87. Процесс нагрева осуществлялся по глубинной схеме (толщина упрочненного слоя не превышала глубины проникновения тока в горячий металл – 0,6...0,8 мм) непрерывно-последовательным способом [14, 15, 24, 26]. Исследования проводились при использовании интенсивного водяного душевого охлаждения поверхности в следующем диапазоне режимов обработки: удельная мощность источника $q_{и} = (1,5...4,0)10^8$ Вт·м⁻², скорость перемещения детали под индуктором $V_d = (0,05...0,1)$ м·с⁻¹. Ширина активного провода индуктора составляла $R_s = 2$ мм, а его длина $b = 10$ мм. Обработка осуществлялась с зазором $\delta = 0,1...0,2$ мм. Чистовое точение производилось на следующих режимах: $V_d = 130$ м/мин ($n_d = 882$ мин⁻¹); $S_o = 0,025$ мм/об.; $t = 0,01...0,015$ мм. При черновом и чистовом точении в качестве

смазывающе-охлаждающего технологического средства (СОТС) использовалась осернённое минеральное масло «Сульфофрезол». Алмазное выравнивание осуществлялось по двухпроходной схеме при использовании спроектированной и изготовленной державки с упругой головкой, в которую устанавливался алмазный наконечник (ТУ2-037-631-88) радиусом $R = 1$ мм. Радиальная составляющая силы выравнивания P_y , с учетом жесткости технологического оборудования, твердости поверхностного слоя обрабатываемой детали после поверхностной закалки ВЭН ТВЧ (700...800 HV) и радиуса алмазной сферы соответственно была равна 150 Н. При этом окружная скорость заготовки составляла $V_{выгл} = 24$ м/мин; а величины подачи – $S_{о выгл} = 0,018$ мм/об. В качестве смазочно-охлаждающего технологического средства при алмазном выравнивании использовалось индустриальное масло марки И-20А [59].

Для определения линейных операционных размеров из условий обеспечения требуемой глубины термоупрочненного слоя была выбрана теория размерных цепей и методика, представленная в работе [60, 61].

В исследовании для одновременного измерения отклонений формы, волнистости и шероховатости поверхности применялись профилограф-профилометры *Uone JD520* и *Form Talysurf Series 2*. Оценку топографии поверхности производили на лазерном профилографе-профилометре *Zygo New View 7300*.

Структурные исследования образцов были проведены на оптическом микроскопе *Carl Zeiss Axio Observer Z1m* и растровом электронном микроскопе *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенном энергодисперсионным анализатором *INCA X-ACT (Oxford Instruments)*. Микроструктура образцов выявлялась травлением 5 %-м спиртовым раствором азотной кислоты, а также насыщенным раствором пикриновой кислоты в этиловом спирте с добавлением поверхностно активных веществ [62].

Микротвердость упрочненного поверхностного слоя деталей оценивали на приборе *Wolpert Group 402MVD*. Исследования остаточных напряжений проводились с использованием рентгеновского метода на дифрактометре высокого разрешения *ARL X'TRA* и механического разрушающего метода – послойного электролитического травления образца [63, 64]. Для выявления

дефектов поверхностного слоя на каждом переходе использовались: визуально-оптический метод с применением микроскопа *Carl ZeissAxio Observer Alm*, капиллярный метод, токовихревой метод с применением вихретокового дефектоскопа ВД – 70.

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

Математическое моделирование тепловых полей и структурно-фазовых превращений при ВЭН ТВЧ

Построение конечно-элементной модели происходило в программных комплексах ANSYS и SYSWELD, использующих численные методы решения дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности (уравнение Фурье), диффузии углерода (2-й закон Фика) и упругопластического поведения материала [27, 28, 33, 34, 38 – 40, 43–45].

Подготовка конечно-элементной модели осуществлялась в программном комплексе ANSYS. Генератором *ANSYS Meshing* была сформирована гексаэдрическая конечно-элементная сетка с использованием следующих типов конечных элементов: *Solid bodies* – твердые тела моделировали 8-узловыми тетраэдрами *SOLID 45*; *Surface bodies* поверхностные тела моделировали 4-узловыми 4-угольными оболочковыми

элементами – *SHELL 63*; *Line bodies* – линейные тела моделировали 2-узловыми линейными элементами *LINK 8*. Размер конечных элементов составлял 0,01 ... 1 мм. При создании конечно-элементной модели были созданы следующие компоненты: «*Volume*» – группа трехмерных элементов, обозначающих обрабатываемый объект; «*Trajectory*» – группа одномерных элементов, которая определяет траекторию перемещения источника энергии высокой концентрации; «*Reference*» – опорная эквидистанта – группа одномерных элементов, способствующая ориентированию локальной системы координат источника энергии; «*StartElem*» – стартовые элементы начала действия источника; «*StartNodes*» и «*EndNodes*» – начальные и конечные узлы на траектории перемещения; «*Skin*» – группа двумерных элементов, обозначающие поверхности, по которым происходят конвективные и радиационные тепловые потери (*Convective and Radiative Losses*); «*ClampedNodes*» – группа узлов, по которым происходит закрепление диска (рис. 4).

Моделирование процесса высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты осуществляли в программном комплексе *SYSWELD*, который позволяет посредством использования модели упруговязкопластического поведения материала и современного математического аппарата, осуществить расчет температурных полей, распределения структурных составляющих, внутренних напряжений и деформаций. В про-

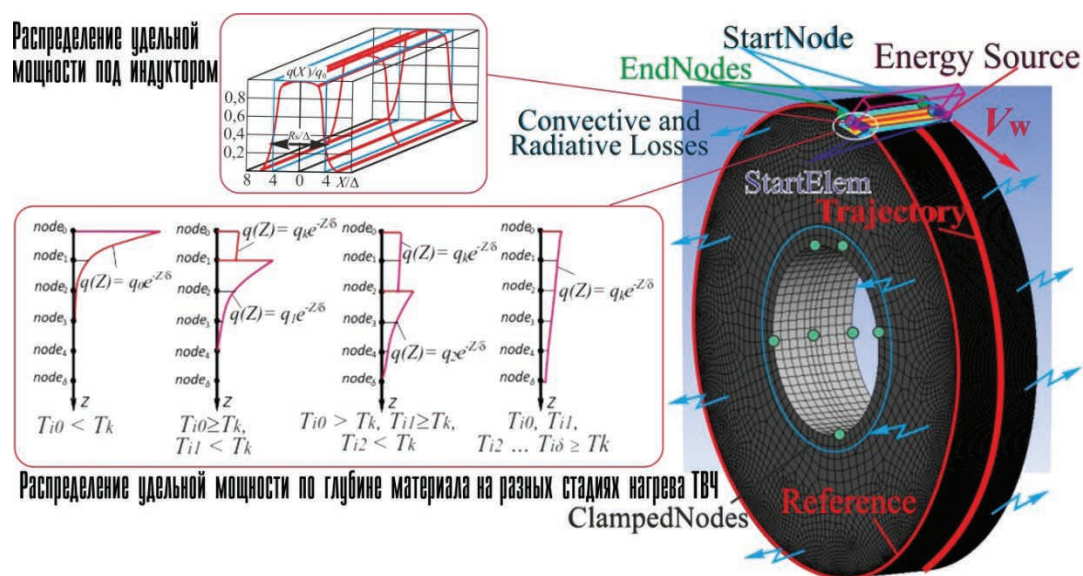


Рис. 4. Конечно-элементная модель процесса ВЭН ТВЧ

Fig. 4. Finite element model of the HEH HFC process

цессе подготовки конечно-элементной модели была учтена специфика распределения удельной мощности источника нагрева ТВЧ непосредственно под индуктором и по глубине материала [27, 28, 33, 34, 38–40, 43–45].

Результаты и их обсуждение

При разработке интегрального металлообрабатывающего оборудования предполагается реализовать на одном из технологических переходов гибридного станка метод высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты. Из-за особенностей конструкции индукторов для ВЭН ТВЧ формирование производящих линий обрабатываемой поверхности происходит локализованными участками нагрева, габариты которых определяются шириной активного провода индуктора и длиной ферритового магнитопровода (см. рис. 1). Вследствие этого для обеспечения поверхностной закалки необходимы точно такие же согласованные относительные движения заготовки и инструмента, как и при формообразовании посредством процессов точения и алмазного выглаживания (рис. 5). Структурно-кинематический анализ показал полную идентичность необходимого набора исполнительных движений и комплекса настраиваемых в них параметров на всех переходах (точение, закалка ВЭН ТВЧ и алмазное выглаживание) интегральной обработки.

На рис. 6 представлены частные структурные формулы компоновок в совокупности со структурно-кинематическими схемами (СКС) для каждого в отдельности метода обработки. Последующий синтез обобщенной кинематической структуры разрабатываемой гибридной металлообрабатывающей системы производился по схеме агрегатного построения компоновки. При этом методе формулу компоновки можно представить в следующем виде: $C_h 0Z(Xrd_1 + WUd_2)$ (рис. 7).

На основе совокупного анализа требуемой структурной формулы компоновки гибридного оборудования, кинематической структуры станка УТ16ПМ 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. 8).

Моделирование технических характеристик гибридного металлообрабатывающего оборудования показало, что для обеспечения сравнимого с механическими операциями уровня производительности формообразования необходимо осуществлять обработку ВЭН ТВЧ на скоростях порядка $V_{II} \in [50, 100]$ мм/с. Проведение натурных экспериментов позволило определить диапазон

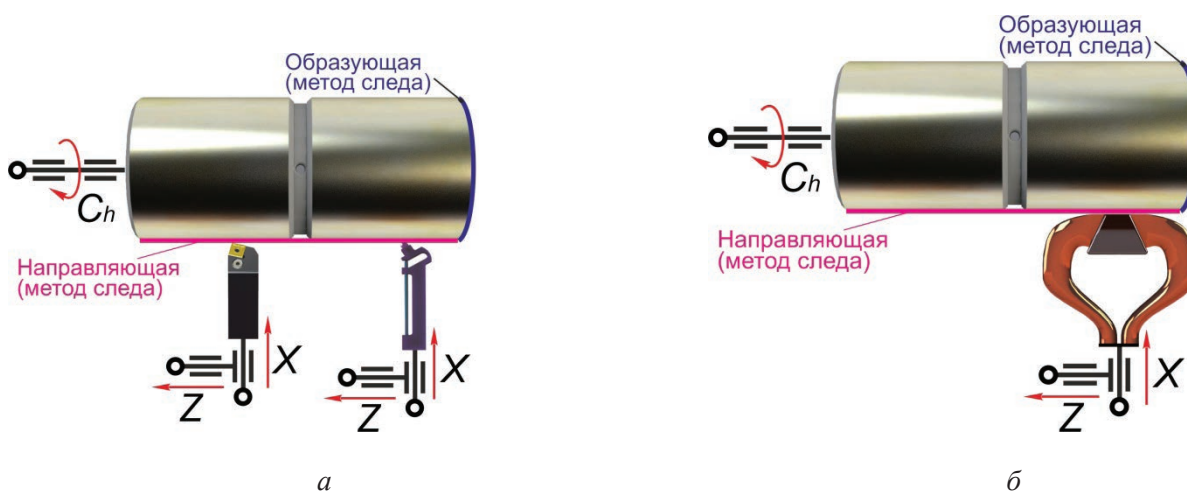


Рис. 5. Формообразование цилиндрической поверхности:

a – при механической обработке (точение и алмазное выглаживание); *б* – при поверхностной закалке ВЭН ТВЧ индуктором петлевого типа с магнитопроводом

Fig. 5. Generation of geometry (cylindrical surface):

a – during machining (turning and diamond smoothing); *б* – during surface hardening by HEH HFC with loop inductor with a magnetic core

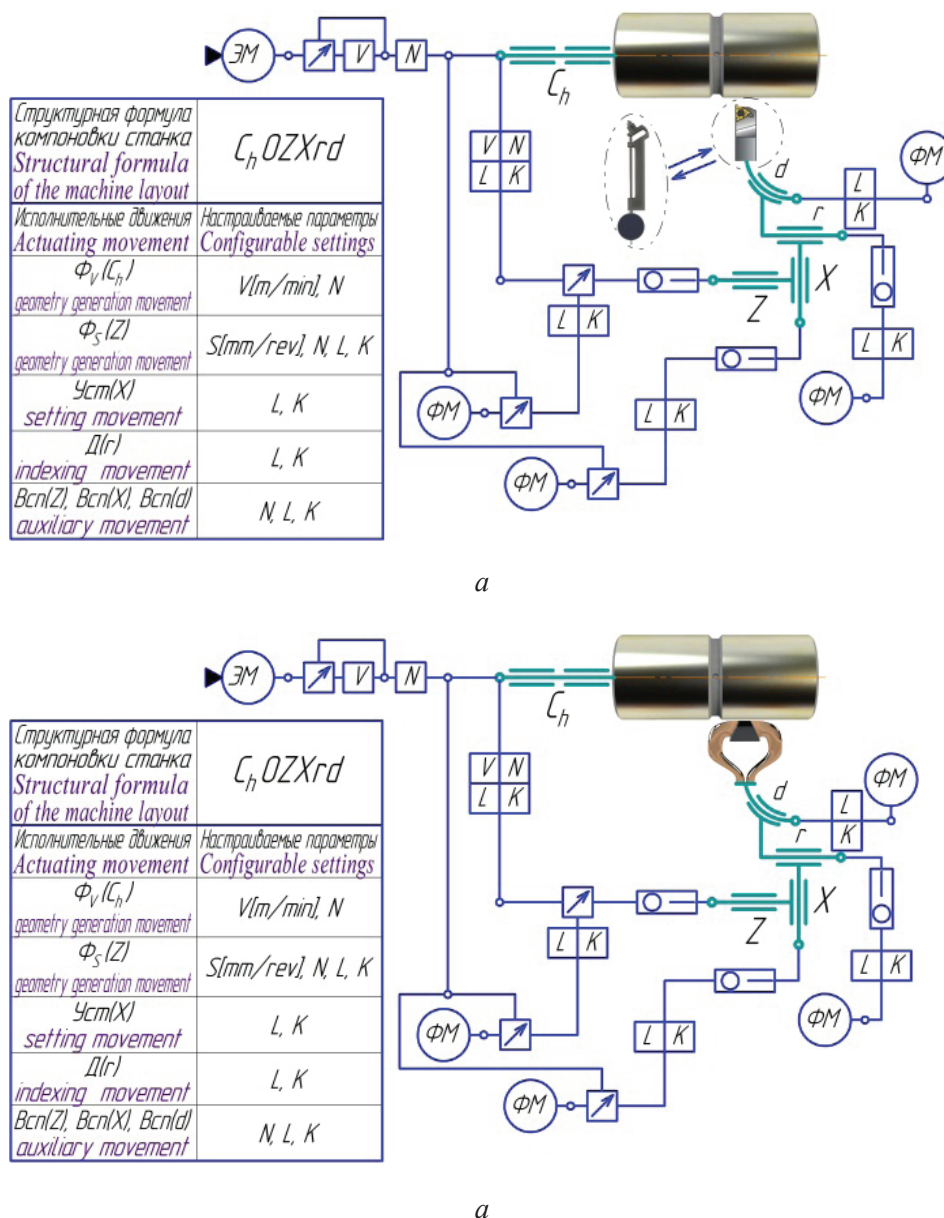


Рис. 6. Структурно-кинематические схемы при обработке цилиндрической поверхности:

а – точение и алмазное выглаживание); б – поверхностная закалка ВЭН ТВЧ индуктором петлевого типа с магнитопроводом

Fig. 6. Structural kinematic schemes for processing a cylindrical surface:

а – turning and diamond smoothing; б – surface hardening by HEN HFC with loop inductor with a magnetic core.

удельных мощностей источника $q_{и}(h, V_d)$, с которыми требуется производить обработку ВЭН ТВЧ: $q_{и} \in [1,5; 4,0] 10^8$ Вт/м². Для обеспечения нижнего диапазона частот вращения шпинделя с заготовкой была произведена модернизация привода главного движения, заключающаяся в его дооснащении частотным преобразователем KIPPRIBOR AFD-E.

Подтверждение эффективности внедрения разработанного гибридного оборудования рас-

смотрим на примере финишной стадии технологического процесса обработки плунжерной втулки (см. рис. 3), построенного по двум различным схемам: по заводской технологии и с использованием предлагаемой интегрированной обработки.

Финишная стадия существующего технологического процесса изготовления плунжерной втулки предусматривает следующие операции: токарная, закалка ТВЧ и шлифование (табл. 2).

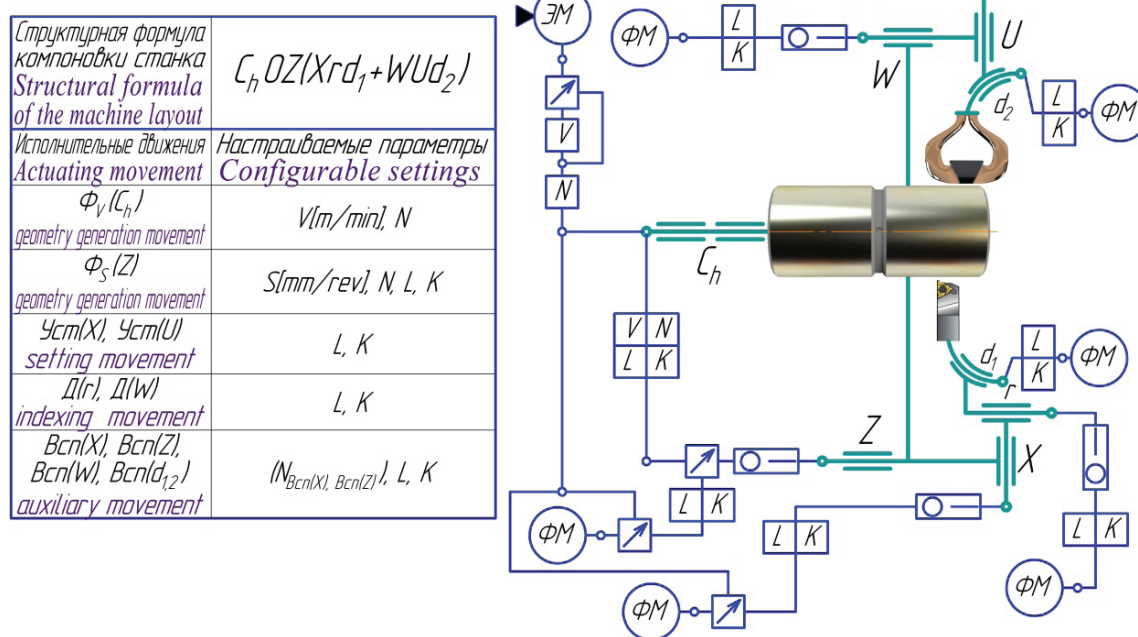


Рис. 7. Структурно-кинематическая схема гибридной металлообрабатывающей системы – структурная формула $Ch0Z(Xrd1+WUd2)$

Fig. 7. Structural kinematic scheme of the hybrid metalworking system: the structural formula is $Ch0Z(Xrd1+WUd2)$

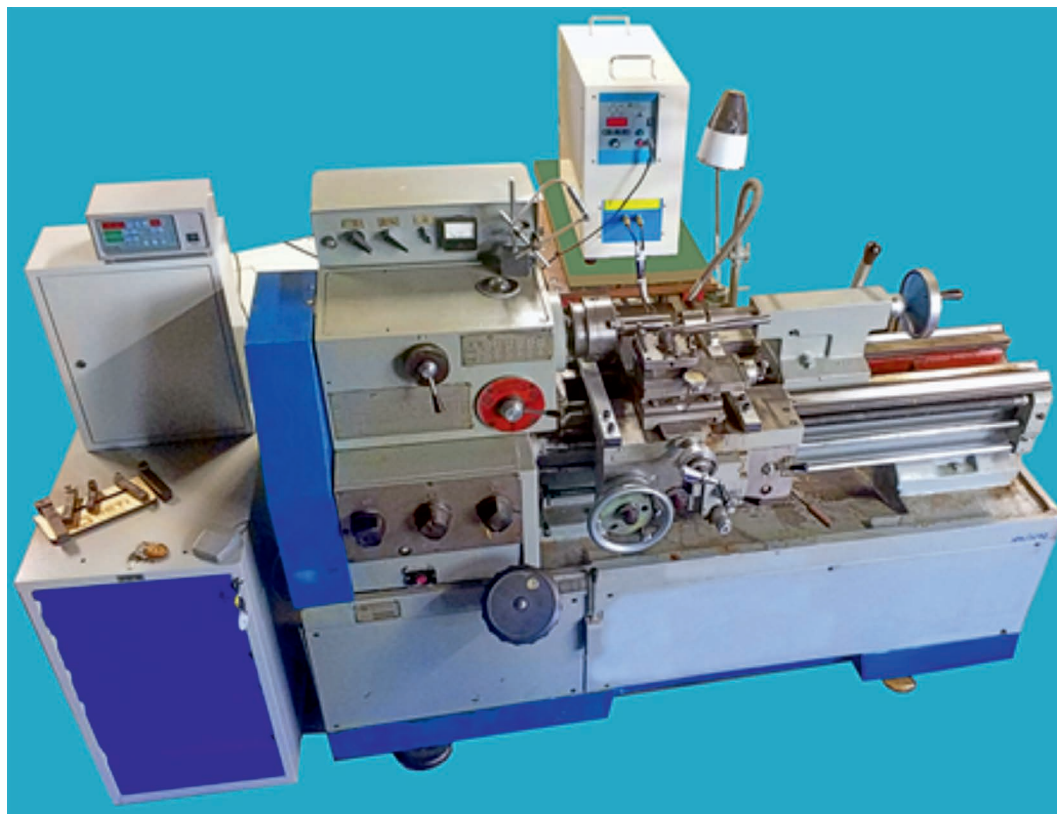


Рис. 8. Гибридный металлообрабатывающий станок

Fig. 8. Hybrid metal working machine

**Исходные данные для расчета припусков и операционных размеров
на обработку закаливаемой поверхности**

**The initial data on the allowances and operating dimensions calculation for the processing
of the hardened surface**

Номер операции / Operation No.	Эскиз / Draft	Содержание операции и технические требования на ее выполнение / The operation and technical requirements for its implementation
15		<i>Точение поверхности 1. Эллиптичность в пределах допуска на диаметр D_1, который подлежит определению / Turning the surface 1. Ellipticity within tolerance on diameter D_1 which is to be determined</i>
20		<i>Закалка ТВЧ поверхности 1 на глубину A_T. Твердость закаленной поверхности 700...800 HV. Увеличение диаметра D_1 вследствие разбухания 8...10 мкм на каждый миллиметр толщины закаленного слоя / Surface 1 hardening by HFC at the depth A_T. The hardness of the hardened surface is 700...800HV. Increase in D_1 diameter caused by the 8... 10 μm swelling per each millimeter of the hardened layer thickness.</i>
25		<i>Окончателное шлифование поверхности 1 / Finish grinding of the surface 1</i>

По условиям чертежа наружная цилиндрическая поверхность 1 должна иметь закаленный слой глубиной 0,6...1,0 мм с уровнем поверхностной микротвердости 700...800 HV. Требуется определить: размер D_1 , допуск на который задан; технологическую глубину закалки ТВЧ A_T и допуск на нее δ_T ; минимальный припуск на окончательную обработку z_{\min} .

Решение этой задачи осуществлялось по методике, представленной в работе [61], согласно которой $D_1 = D_{i-1}$ и $\delta_{i-1} = 0,1$ мм, $A_K = 0,6...1,0 = 0,6^{+0,4}$ мм, допуск замыкающего звена $\delta_K = 0,4$ мм.

1. Для определения допускаемого колебания глубины резания δ_i необходимо знать величину допуска на глубину закалки ТВЧ δ_T , который,

как правило, определяется на основе экспериментальных данных. Закалка ТВЧ проводится со стабилизацией подводимой мощности. В этом случае основным критерием, определяющим изменение глубины упрочненного слоя, является постоянство зазора между индуктором и нагреваемой поверхностью.

По заводской технологии деталь базируется по поверхности 2 на жесткую оправку, устанавливаемую в центрах. Закалка осуществляется непрерывно-последовательным способом с использованием кольцевого индуктора $D_1^{+0,74}$ ($D = 52$ Н14) (рис. 9). Технологический зазор между индуктором и деталью составляет 3 мм. В этом случае изменение зазора обусловлено смещением центра вращения детали, которое

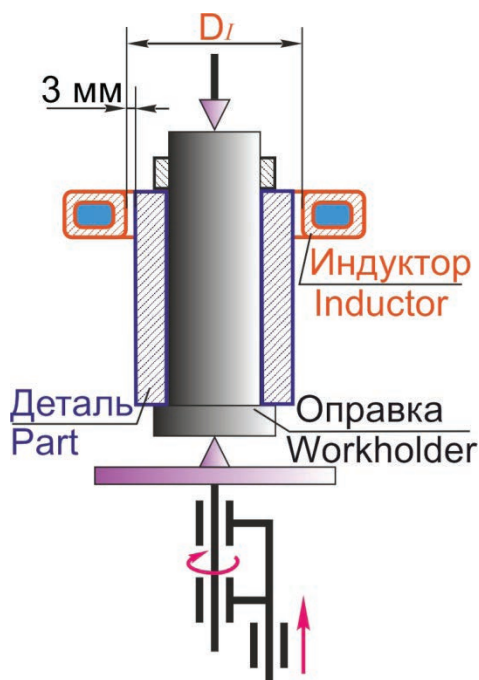


Рис. 9. Схема закалки детали ТВЧ по заводской технологии

Fig. 9. Diagram of workpiece HFC hardening by the standard technology

определяется погрешностью формы индуктора и погрешностью установки детали.

Для получения симметричного по окружности слоя применяют вращение детали. По экспериментальным данным было установлено, что для данных условий закалки ТВЧ при условии выверки индуктора относительно оси центров – $\delta_T = 0,1$ мм. В этом случае имеем $\delta_i = 0,4 \dots 0,1 = 0,3$ мм.

2. Определяем допустимое значение суммарного пространственного отклонения $\sum \delta_{ei}$ с учетом операционных допусков на несоосность δ_{ei} , последовательности операций, способов базирования и установки.

По данным работ [27, 28, 65], для углеродистых сталей увеличение удельного объема закаливаемой поверхности составляет 0,5 %. При поверхностной закалке, когда направления свободного расширения ограничены, можно ожидать увеличение диаметра на 8...10 мкм на каждый миллиметр толщины закаленного слоя. В нашем случае глубина закалки по заводской технологии составляет 1,05...1,15 мм, следовательно, величина $A_p = 0,0084 \dots 0,0115$ мм, $\delta_p = 0,0031$ мм. Исходя из этого можно определить величину допуска δ'_{i-1} :

$$\delta'_{i-1} = \delta_{i-1} + \delta_p = 0,1 + 0,0031 = 0,1031 \text{ мм.}$$

В этом случае

$$\begin{aligned} 2\delta_{e\Delta} &= \delta_i - \frac{\delta_i + \delta'_{i-1}}{2} = \\ &= 0,3 - \frac{0,025 + 0,1031}{2} = 0,23595 \text{ мм.} \end{aligned}$$

3. Определим возможное значение пространственных отклонений $\sum \delta_{ei}$ с учетом операционных допусков δ_{ei} на несоосность, последовательности операций, способов базирования и установки.

На финишных операциях 20 и 25 заводской технологией предусматривается обработка на жесткой оправке. В этом случае погрешность базирования детали на жесткую оправку

$$\begin{aligned} \varepsilon_{61} &= \delta_0 + \delta_1 + \delta_2 = \\ &= 0,02 + 0,13 + 0,021 = 0,171 \text{ мм,} \end{aligned}$$

где δ_0 – минимальный зазор; δ_1, δ_2 – допуски от верстия и оправки, мм.

Погрешность базирования оправки в центрах $\varepsilon_{62} = 0,02$ мм. Погрешность закрепления детали и оправки $\varepsilon_3 = 0,03$ мм. Общая погрешность установки детали

$$\begin{aligned} \varepsilon_y &= \varepsilon_{61} + \varepsilon_{62} + \varepsilon_3 = \\ &= 0,171 + 0,02 + 0,03 = 0,221 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Кроме погрешности установки на значение суммарного пространственного отклонения оказывает влияние величина деформации δ_{ii} (изогнутость, коробление) полого цилиндра после поверхностной закалки, которая возникает из-за неравномерности глубины закаленного слоя и зависит от толщины стенки, соотношения толщины стенки и диаметра цилиндра, от относительной глубины закаленного слоя. Закалка наружной поверхности приводит к появлению «бочки». Для данного случая величина $\delta_{ii} = 0,010$ мм. Тогда $2\sum \delta_{ei} = \varepsilon_y + \delta_{ii} = 0,221 + 0,010 = 0,231$ мм. В данном случае условие $\sum \delta_{ei} \leq \delta_{e\Delta}$ выполняется.

4. Определяем искомый размер – технологическую глубину A_T термоупрочненного слоя. Предельные значения замыкающего размера

$$A_{Kmax} = A_{Tmax} - t_{min} \text{ и } A_{Kmin} = A_{Tmin} - t_{max}. \quad (2)$$

Качественная окончательная обработка поверхности после термоупрочнения возможна при условии $t_{i\min} \geq (R_z + T)_{i-1}$, где R_z , T – шероховатость поверхности и глубина дефектного слоя на предшествующей обработке. Такое минимальное значение припуска должно обеспечиваться и при неблагоприятном сочетании значений параметров, влияющих на его величину: при $D_{i-1\max}$ и $D_{i-1\min}$. На операции 15 осуществляется получистовое точение $R_z = 0,05$ мм, $T_{i-1} = 0,05$ мм. Следовательно, $t_{i\min} = 0,05 + 0,05 = 0,10$ мм, а $t_{i\max} = t_{i\min} + \delta_t = 0,10 + 0,30 = 0,40$ мм.

Решая уравнения (2) относительно искомого размера, получим

$$A_{T\max} = A_{K\max} + t_{i\min} = 1,0 + 0,10 = 1,10 \text{ мм};$$

$$A_{T\min} = A_{K\min} + t_{i\max} = 0,6 + 0,4 = 1,0 \text{ мм}.$$

5. Определим припуск на окончательную обработку по уравнению

$$\begin{aligned} z_{i\min} &= 2(R_z + T)_{i-1} + 2\Sigma\delta_{ei} = \\ &= 2 \cdot 0,10 + 0,231 = 0,431 \text{ мм}. \end{aligned}$$

6. В этом случае размер предварительной обработки поверхности l с учетом разбухания будет равен $D_{i-1} = D_i + z_{i\min} + \delta_{i-1} - A_{P\min}$, тогда $D_1 = 46 + 0,431 + 0,10 - 0,008 = 46,523$ мм. По заводской технологии D_1 принят равным 46,5 мм.

Таким образом, искомые параметры: технологическая глубина закалки $A_T = 1,0^{+0,1}$ мм; размер предварительной обработки $D_1 = 46,5_{-0,1}$ мм; припуск на окончательную обработку $z_{i\min} = 0,431$ мм. При этом следует отметить, что 5...8 % деталей бракуются по наличию прижогов и микротрещин на поверхности (по данным предприятия).

Для обеспечения данной глубины упрочненного слоя при использовании генератора с частотой 440 кГц необходимо реализовать поверхностную схему нагрева, которая характеризуется более низкими значениями удельной мощности и скорости движения источника нагрева по отношению к объемной схеме. При ширине активного провода индуктора $R_s = 12$ мм – $q_{и} = 1,2 \cdot 10^7$ Вт/м², $V_d = 2$ мм/с.

На детали необходимо закалить два участка общей длиной 94 мм. Оба участка обрабатываются за одно осевое перемещение детали отно-

сительно кольцевого индуктора. Общая длина хода детали с учетом наличия канавки шириной 6 мм и захода и выхода индуктора при непрерывно-последовательной схеме нагрева составляет $l = 114$ мм. В этом случае основное время составляет $T_o = l/V_d = 57$ с, при этом согласно общемашиностроительным нормам на термическую обработку на установках ТВЧ при указанном способе базирования детали (см. рис. 9) вспомогательное время $T_{всп} = 20$ с. Таким образом, штучная производительность равна

$$P_{шт} = \frac{1}{T_o + T_{всп}} = \frac{1}{57 + 20} = 0,013 \text{ с}^{-1},$$

а энергозатраты

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{q_{и} \pi D_1 R_s l}{V_d} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 10^7 \pi 0,0465 \cdot 0,012 \cdot 0,114}{0,002} \approx 0,333 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Финишная стадия с использованием предлагаемой интегрированной обработки: в данном случае три финишные операции заменяются одной интегрированной, состоящей из трех переходов: 1) точение (черновое, получистовое, однократное чистовое); 2) закалка ВЭН ТВЧ; 3) окончательное чистовое точение и алмазное выглаживание (табл. 3).

1. Закалка ВЭН ТВЧ осуществляется по схеме (рис. 10). В этом случае неравномерность закаленного слоя по глубине определяется точностью изготовления активного провода индуктора и его положением относительно оси обрабатываемого изделия. На основании экспериментальных результатов и с использованием выверки активного провода индуктора по индикатору $\delta_T = 0,05$ мм. Следовательно, $\delta_t = \delta_K - \delta_T = 0,4 - 0,05 = 0,395$ мм.

2. Глубина закалки 0,6...1,0 мм, следовательно, величина $A_p = 0,0048...0,010$ мм, $\delta_p = 0,0052$ мм. Таким образом,

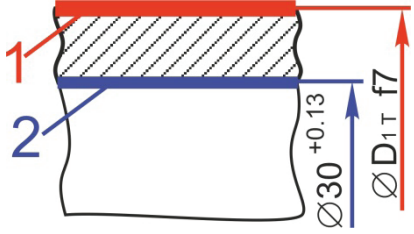
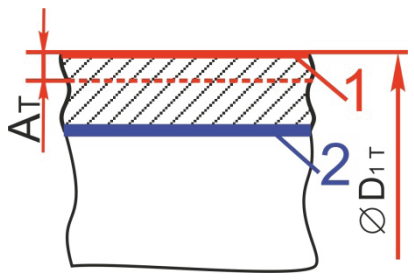
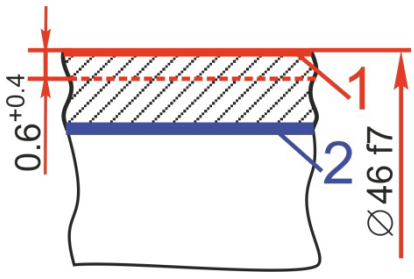
$$\delta'_{i-1} = \delta_{i-1} + \delta_p = 0,01 + 0,0052 = 0,0152 \text{ мм}.$$

Тогда допустимое значение суммарного пространственного отклонения будет равно

$$\begin{aligned} 2\delta_{e\Delta} &= \delta_t - \frac{\delta_i + \delta'_{i-1}}{2} = \\ &= 0,395 - \frac{0,025 + 0,0152}{2} = 0,3749 \text{ мм}. \end{aligned}$$

**Исходные данные для расчета припусков и операционных размеров на обработку
закаливаемой поверхности с использованием интегрированной обработки**

**The initial data on the allowances calculation and operational dimensions for treating the hardened surface
using integrated processing**

Номер перехода / Transition No.	Эскиз / Draft	Содержание операции и технические требования на ее выполнение / The operation and technical requirements for its implementation
1		<i>Точение поверхности 1. Эллиптичность в пределах допуска на диаметр D1, который подлежит определению / Turning the surface 1. Ellipticity within tolerance on diameter D1 which is to be determined.</i>
2		<i>Закалка ТВЧ поверхности 1 на глубину AT. Твердость закаленной поверхности 700...800 HV. Увеличение диаметра D1 вследствие разбухания 8...10 мкм на каждый миллиметр толщины закаленного слоя / Surface 1 hardening by HFC at the depth AT. The hardness of the hardened surface is 700...800 HV. Increase in D1 diameter caused by the 8... 10 µm swelling per each millimeter of the hardened layer thickness.</i>
3		<i>Окончательное чистовое точение и алмазное выглаживание поверхности 1 / Final finish turning and diamond smoothing of the surface 1</i>

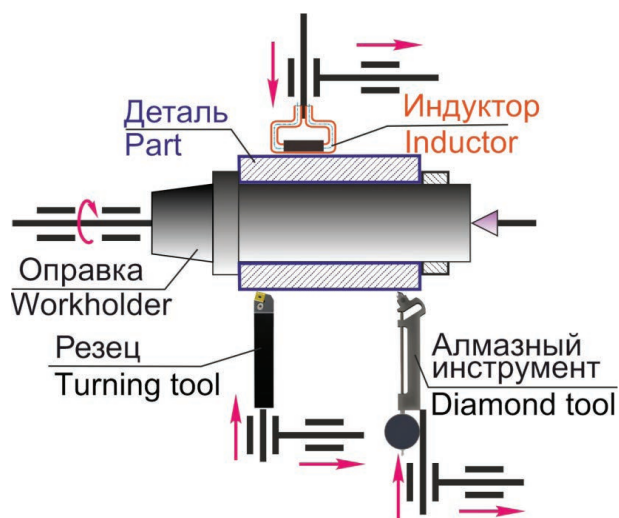


Рис. 10. Схема интегральной обработки детали

Fig. 10. Integrated part processing scheme

3. Предлагаемая финишная стадия технологического процесса осуществляется без переустановки заготовки, поэтому, несмотря на то что используется та же оснастка, погрешность установки $\varepsilon_y = 0$. Первый переход – черновое полустовое точение поверхности позволяет устранить погрешности, возникшие на предыдущей стадии технологического процесса и погрешности установки детали. Это, в свою очередь, обеспечивает постоянство зазора между индуктором и обрабатываемой поверхностью, а следовательно, и равномерность глубины закаленного слоя. В этом случае величина коробления после поверхностной закалки $\delta_{\text{н}} = 0$. Тогда $2\sum \delta_{ei} = 0$.

Реальное значение величины δ_t равно

$$\begin{aligned}\delta_t &= \sum \delta_{ei} + \frac{\delta_i + \delta'_{i-1}}{2} = \\ &= 0 + \frac{0,025 + 0,0152}{2} = 0,0201 \text{ мм.}\end{aligned}$$

4. Окончательное чистовое точение осуществляется после закалки, следовательно, $T_{i-1} = 0$. В связи с тем что поверхностная закалка осуществляется без изменения шероховатости поверхности, а механическая обработка ведется одним шлифовальным кругом, достижение заданной чертежом шероховатости поверхности $Ra = 0,4$ мкм предполагается за счет использования процесса алмазного выравнивания. На основании этого величина $R_z = 0$, следовательно, $t_{\min} = 0$, $t_{\max} = t_{\min} + \delta_t = 0 + 0,0201 = 0,0201 \approx 0,02$ мм.

Решая уравнения (2) относительно искомого размера, получим

$$A_{T_{\max}} = A_{K_{\max}} + t_{\min} = 1,0 + 0 = 1,0 \text{ мм};$$

$$A_{T_{\min}} = A_{K_{\min}} + t_{\max} = 0,6 + 0,02 = 0,62 \text{ мм.}$$

5. Определим припуск на окончательную обработку по уравнению

$$z_{i\min} = 2(R_z + T)_{i-1} + 2\sum \delta_{ei} = 0.$$

6. В этом случае размер предварительной обработки поверхности l с учетом разбухания будет равен:

$$\begin{aligned}D_{i-1} &= D_i + z_{i\min} + \delta_{i-1} - A_{p\min} = \\ &= 46 + 0 + 0,01 - 0,00496 = 46,00504 \text{ мм.}\end{aligned}$$

Таким образом, искомые параметры: технологическая глубина закалки $A_T = 0,62^{+0,38}_{-0,050}$ мм; размер предварительной обработки $D_1 = 46^{+0,025}_{-0,050}$ мм; припуск на окончательную обработку $z_{\min} = 0$.

По предлагаемой схеме обработки первым переходом является предварительное точение детали в размер $D = 46^{+0,025}_{-0,050}$ мм. В связи с тем что предварительная обработка осуществляется из сырого (незакаленного) материала, точение осуществляется на более «жестких» режимах по отношению к заводской технологии. Кроме того, рассматриваемая интегральная технология позволяет усовершенствовать технологию формо-

образования при механической обработке за счет дополнительного подогрева заготовки концентрированным источником энергии. Нагрев детали токами высокой частоты, осуществляющийся перед режущим инструментом, позволяет снизить сопротивление резанию, делая заготовку более податливой для формообразования, тем самым достигается дополнительный эффект, позволяющий интенсифицировать режимные параметры при черновом точении. При этом последующим переходом «Закалка ТВЧ» за счет нагрева конструкционной стали под закалку станет возможным нивелировать опасный уровень напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки на окончательное состояние материала.

С целью назначения рациональных режимов поверхностной закалки в условиях гибридной обработки была установлена взаимосвязь численных значений интегральной температурно-временной характеристики с режимами обработки ВЭН ТВЧ и с глубиной упрочнения.

На рис. 11 представлены установленные минимальные значения характеристики $S \in (4,3 > S > 2,5) ^\circ\text{C} \cdot \text{с}$, которые необходимо реализовать в поверхностных слоях при закалке доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сталей с использованием высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты, обеспечивающих получение гомогенного

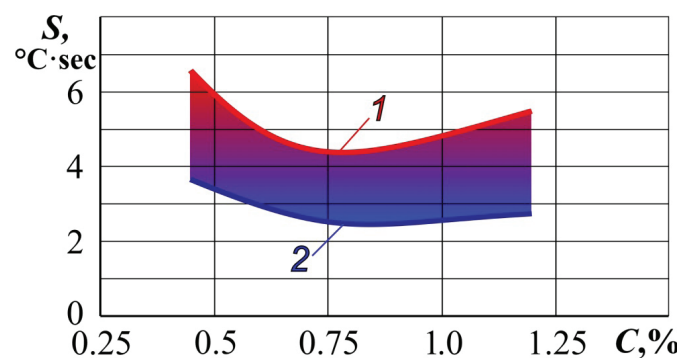


Рис. 11. Зависимость температурно-временной характеристики от концентрации углерода в стали: 1 – получение однородного аустенита; 2 – содержание углерода в аустените, при котором в стадии охлаждения может быть зафиксировано 50 % мартенсита

Fig. 11. Dependence of the temperature-time characteristic on the carbon concentration in steel: 1 – obtaining homogeneous austenite; 2 – carbon content in austenite, at which 50% of martensite can be fixed in the cooling stage

по углероду аустенита при различном состоянии исходной структуры материала [28]. Необходимо отметить, что данные зависимости (рис. 11) получены в результате совместного моделирования температурных полей и структурно-фазовых превращений в материале, причем линия 2 является минимальным значением характеристики S для получения 50 % мартенсита после охлаждения. Однако, как показал численный и натурный эксперимент, в большинстве случаев максимальные значения характеристики превышают эти значения. Это связано с неравномерностью распределения характеристики S по глубине материала. Причем, чем меньше глубина упрочненного слоя, тем ближе значения характеристики S к рекомендованным значениям, что лишний раз подтверждает большую эффективность глубинной схемы нагрева по отношению к поверхностной [28, 43–45].

Закономерность изменения значения характеристики S соответствует характеру изменения значений максимальных температур по глубине материала. Максимальные значения этой характеристики для ВЭН ТВЧ достигаются на глубине порядка 0,2 мм. Исходя из этого были установлены зависимости значений характеристики S , реализуемой на глубине 0,2 мм, от величины получаемого упрочненного слоя:

$$S_{45}(h) = 0,55 + 3,69h - 5,95h^2 + 38,62h^3, \quad (3)$$

$$S_{U8}(h) = 0,90 + 3,19h - 5,14h^2 + 50,18h^3. \quad (4)$$

Для установления функциональных зависимостей интегральной температурно-временной характеристики S от технологических режимов обработки для рассматриваемых марок сталей экспериментальные данные обрабатывались с использованием программных продуктов *STATISTICA 6.0* и *Table Curve 3D v 4.0*:

$$S(q_n, V_d) = a + bV_d + cq_n + dV_d^2 + eq_n^2 + fV_dq_n + gV_d^3 + hq_n^3 + iV_dq_n^2 + jV_d^2q_n, \quad (5)$$

для стали 45:

$$\begin{aligned} a &= -3,601893, b = 243,31624, c = 3,048266 \cdot 10^{-7}, \\ d &= -2277,1586, \\ e &= 7,0241349 \cdot 10^{-16}, f = -8,7904966 \cdot 10^{-6}, g = \\ &= -2797,853, h = 5,5163545 \cdot 10^{-25}, \\ i &= -1,0355329 \cdot 10^{-14}, j = 6,4796934 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

для стали У8А:

$$\begin{aligned} a &= -85,253883, b = 3173,1572, c = \\ &= 4,8366164 \cdot 10^{-7}, d = -19522,903, \\ e &= 1,8005625 \cdot 10^{-15}, f = -2,2665061 \cdot 10^{-5}, g = \\ &= -122995,64, h = 4,0624994 \cdot 10^{-24}, \\ i &= -5,344947 \cdot 10^{-14}, j = 2,7815479 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Максимальная погрешность не превышает 5 %.

Поскольку изменение геометрических параметров источника при ВЭН ТВЧ связано с трудоемким изготовлением нового индуктора, то в качестве варьируемых величин приняты удельная мощность источника нагрева и скорость его перемещения. Поэтому в практике индукционного нагрева принято изначально задаваться размером источника, а затем определять два остальных технологических параметра.

Таким образом, совместное решение системы уравнений $\begin{cases} S_{45/U8}(h), \\ S_{45/U8}(q_n, V_d) \end{cases}$ позволит согласно

требуемой глубине закалки определить режимы ВЭН ТВЧ. Однако, как показали результаты математического и натурального экспериментов, полученные диапазоны режимов упрочнения не гарантируют формирование закаленного слоя без наличия закалочных трещин, основной причиной появления которых является внутреннее напряженное состояние материала.

В связи с тем что основной технологической характеристикой при поверхностной закалке является глубина упрочнения (необходимый уровень твердости обеспечивается подбором соответствующей марки стали), воздействовать на величину и характер распределения остаточных напряжений возможно лишь путем изменения величины переходной зоны.

Учитывая тот факт, что очагом разрушения детали в процессе эксплуатации является месторасположение максимальных растягивающих напряжений $\sigma_{p \max}$, необходимо переместить опасную зону как можно глубже от поверхности изделия. Естественно, глубина залегания p_{\max} будет наибольшей в том случае, если величина переходного слоя окажется максимальной. Однако в этом случае наблюдается значительное снижение сжимающих напряжений $\sigma_{c \max}$ на поверхности. Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований показал, что величина переходного слоя должна составлять 25...33 %

от глубины упрочненного слоя. Именно при выполнении этого требования существует определенный баланс между тем, что значения $\sigma_{p\max}$ смещаются в более глубокие слои материала и при этом величина сжимающих напряжений на поверхности в среднем уменьшается не более чем на 6...10 %. При этом большие значения величины переходной зоны необходимо обеспечивать при закале сталей с большим содержанием углерода [27, 28, 39, 45].

В этом случае при выборе режимов поверхностной закалки деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, вводится еще один критерий – относительная величина переходной зоны $\Psi(q_n, V_d)$, т. е. отношение величины переходной зоны к глубине закаленного слоя.

В результате обработки результатов экспериментальных исследований были получены соответствующие функциональные зависимости для исследуемых материалов и диапазонов режимов обработки (q_n [Вт/м²], V_d [м/с]):

$$\Psi(q_n, V_d) = k + lV_d + mq_n + nV_d^2 + oq_n^2 + pV_dq_n + rV_d^3 + sq_n^3 + tV_dq_n^2 + uV_d^2q_n, \quad (6)$$

где $0,25 \leq \Psi(q_n, V_d) \leq 0,33$.

Значение коэффициентов функциональной зависимости:

для стали 45:

$$\begin{aligned} k &= 0,087564, l = -7,429933, m = 1,062284 \cdot 10^{-8}, \\ n &= 235,19293, \\ o &= -3,424286 \cdot 10^{-17}, p = -8,850919 \cdot 10^{-8}, r = \\ &= -1309,3045, s = 2,9423 \cdot 10^{-26}, \\ t &= 1,403793 \cdot 10^{-16}, u = 1,010925 \cdot 10^{-7}; \end{aligned}$$

для стали У8А:

$$\begin{aligned} k &= 0,013232, l = 7,354214, m = 5,814168 \cdot 10^{-9}, \\ n &= 31,678703, \\ o &= -1,724837 \cdot 10^{-17}, p = -8,746601 \cdot 10^{-8}, r = \\ &= -543,57972, s = 1,233 \cdot 10^{-26}, \\ t &= 1,139227 \cdot 10^{-16}, u = 2,287546 \cdot 10^{-7}. \end{aligned}$$

Таким образом, определение удельной мощности и скорости перемещения источника при поверхностной закалке осуществляется посредством решения системы уравнений

$$\begin{cases} S_{45/U8}(h), \\ S_{45/U8}(q_n, V_d), \text{ при заданных значениях глубины} \\ \Psi_{45/U8}(q_n, V_d) \end{cases}$$

ны закалки и относительной величины переходной зоны. На рис. 12 представлено графическое решение данной задачи. Можно заметить, что полученный диапазон режимов обработки существенно уже по отношению к назначению режимов исходя из обеспечения лишь заданной глубины упрочненного слоя (кривые 1 и 2).

Для обеспечения глубины упрочненного слоя $h = 0,62$ мм принимаем следующие режимные параметры: 1) для стали 45 диапазон рекомендуемых режимов ограничен точками А и В на кривой 1 – $q_n = (3,0...3,4)10^8$ Вт/м², $V_d = (74...81)$ мм/с; 2) для стали У8А диапазон рекомендуемых режимов ограничен точками С и D на кривой 2: при этом $q_n = (2,4...2,8)10^8$ Вт/м², $V_d = (68...75)$ мм/с. Полученные режимы обработки гарантируют получение необходимой глубины закалки и рациональную величину переходной зоны.

Поскольку закалка осуществляется за один установ детали, то $T_{всп} = 0$ с. В этом случае штучная производительность обработки будет равна технологической производительности.

Расчет производительности и энергозатрат на переходе «Закалка ТВЧ» осуществляем по следующим формулам:

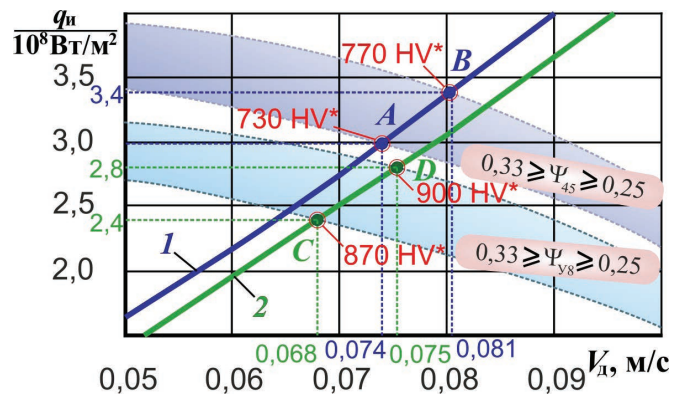


Рис. 12. Зависимость удельной мощности источника от его скорости движения при закалке ВЭН ТВЧ стали 45 и У8А на глубину 0,62 мм:

1 – сталь 45; 2 – сталь У8А

* Уровень микротвердости поверхностного слоя детали, достигнутый после перехода «Закалка ТВЧ»

Fig. 12. The dependence of specific power of the source on its speed while hardening steel 45 and U8 by applying HEH HFC to a depth of $h = 0,62$ mm:

1 – steel 45; 2 – steel U8A

* The level of microhardness of the surface layer of the part, achieved after the transition “Hardening by HFC”

$$P_{\text{шт}} = \frac{(V_d/\pi D)b}{L}, \quad \Theta = \frac{q_n b R_S}{P_{\text{шт}}} = \frac{q_n b R_S L}{(V_d/\pi D)b},$$

где $L = 104$ мм (см. рис. 3), $b = 10$ мм (см. рис. 1). Результаты расчета энергозатрат и производительности при термоупрочнении детали для всех сочетаний режимных параметров и марок сталей представлен в табл. 4.

Анализ полученных результатов показывает, что использование интегральной обработки позволяет по отношению к существующей на предприятии технологии повысить производительность поверхностной закалки ТВЧ в 3,5...4,1 раза, а энергозатраты снизить в 9,5...11,3 раза.

На рис. 13, 14 представлены результаты оптической микроскопии, данные измерений микротвердости и остаточных напряжений, а также результаты математического моделирования для двух режимов. 1. Сталь У8А – режим, обозначенный точкой **C** ($P_{\text{шт}}$ увеличивается 3,5 раза, а Θ уменьшаются в 11,3 раза): $q_n = 2,4 \cdot 10^8$ Вт/м², $V_d = 68$ мм/с. 2. Сталь 45 – режим, обозначенный точкой **B** ($P_{\text{шт}}$ увеличивается 4,1 раза, а Θ уменьшаются в 9,5 раз): $q_n = 3,4 \cdot 10^8$ Вт/м², $V_d = 81$ мм/с.

Анализируя графики распределения микротвердости поверхностного слоя, можно выделить три характерные зоны (рис. 13, а, г и 14, а, б): зона I – характеризуется стабильным средним значением уровня микротвердости; зона II – переходная зона; зона III – зона, не перенесшая структурно-фазовых изменений. За глубину закаленного слоя принимают расстояние от поверхности до зоны со структурой, со-

держащей 50 % мартенсита. В свою очередь, переходной слой – это зона между поверхностным слоем закаленной стали со стабильным средним уровнем микротвердости и зоной материала, в котором не произошло никаких структурно-фазовых превращений.

Последующим алмазным выглаживанием поверхности 1 (рис. 3) удалось достигнуть уровня шероховатости порядка $Ra = 0,1$ мкм (рис. 15, а), при этом происходит повышение микротвердости и увеличение уровня сжимающих напряжений в поверхностном слое до значений 870 НВ и $\sigma_{\tau} = -650 \pm 20$ МПа соответственно (рис. 15, б).

Закключение

Представлена оригинальная методика проведения структурно-кинематического анализа для предпроектных исследований гибридного металлообрабатывающего оборудования. Разработаны методологические рекомендации по модернизации металлорежущих станков, выполнение которых позволит реализовать высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ) на стандартной станочной системе и обеспечить формирование наукоемкого технологического оборудования с расширенными функциональными возможностями. Предложен единый интегральный параметр температурно-временного воздействия на конструкционный материал при назначении режимов упрочнения концентрированными источниками нагрева, гарантирующих требуемый комплекс показателей качества поверхностного слоя деталей

Таблица 4

Table 4

Результаты расчета производительности и энергозатрат поверхностной закалки посредством ВЭН ТВЧ в условиях интегрированной обработки

The results of calculating the productivity and energy consumption of surface hardening by means of HEN HFC under the conditions of integrated processing

Сталь, режим / Steel, mode		Скорость $V_{д}$, м/с / Speed V_w , m/s	Удельная мощность $q_{и}$, 10^8 Вт/м ² / Specific power qs , 10^8 W/m ²	Производительность, с ⁻¹ Productivity, s ⁻¹	Энергозатраты, кВт·ч Energy consumption, kW·h
45	A	0,074	3,0	0,049	0,034
	B	0,081	3,4	0,054	0,035
У8А	C	0,068	2,4	0,045	0,029
	D	0,075	2,8	0,050	0,031

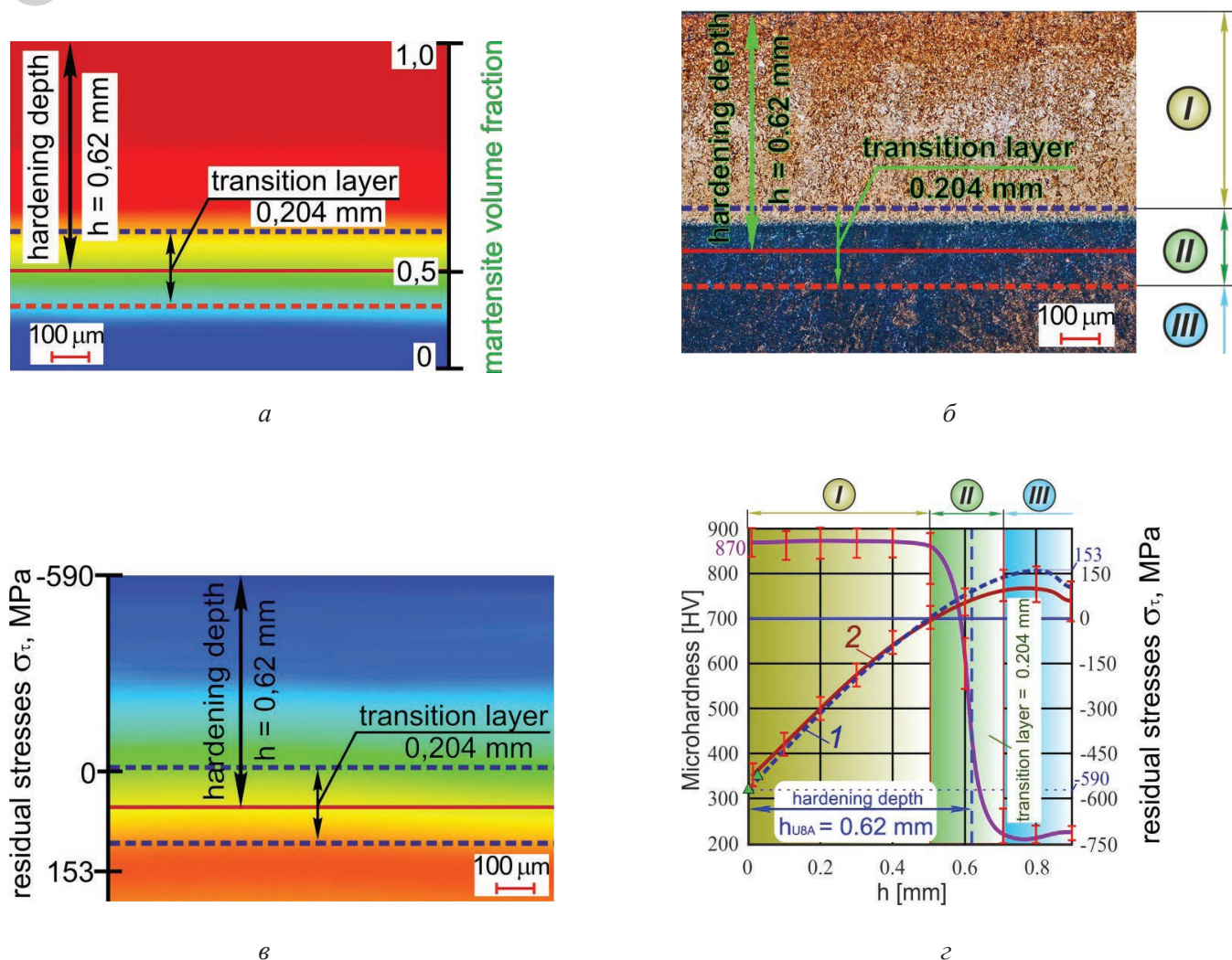


Рис. 13. Результаты экспериментов для деталей, изготовленных из стали У8А:

а – оптическая микроскопия; *б* – результаты моделирования структурно-фазовых превращений – распределение объемной доли мартенситной структуры; *в* – результаты моделирования напряженно-деформированного состояния – распределение тангенциальных остаточных напряжений; *г* – распределение микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое: 1 – расчетная эпюра тангенциальных остаточных напряжений; 2 – эпюра остаточных напряжений, полученная экспериментально (механическим разрушающим методом); ▲ – остаточные напряжения, полученные рентгеновский методом определения

Fig. 13. Experimental results for parts made of U8A steel:

а – optical microscopy; *б* – the simulation results of structural-phase transformations – distribution of the volume fraction of the martensite structure; *в* – the distribution of tangential residual stresses (simulation results); *г* – the distribution of microhardness and residual stresses in the surface layer: 1 – is a calculated plot of the tangential residual stresses; 2 – is a plot of residual stresses obtained experimentally (by mechanical destructive method); ▲ – residual stresses obtained by X-ray determination

машин, при обеспечении энергоэффективности и производительности обработки в целом. Экспериментально подтверждено, что внедрение в производство предлагаемого гибридного станка в совокупности с разработанными рекомендациями по назначению режимов ВЭН ТВЧ в условиях интегральной обработки детали типа «Втулка плунжерная» по отношению к заводской технологии позволяет повысить производительность поверхностной за-

калки в 3,5...4,1 раза и снизить энергозатраты в 9,5...11,3 раза. Выполнение представленной работы позволило получить информацию для решения критической проблемы современного машиностроения: обеспечение заданного высокого качества продукции, сокращение производственного цикла изготовления, минимизация себестоимости выпускаемых изделий и формирование новых поверхностных характеристик деталей.

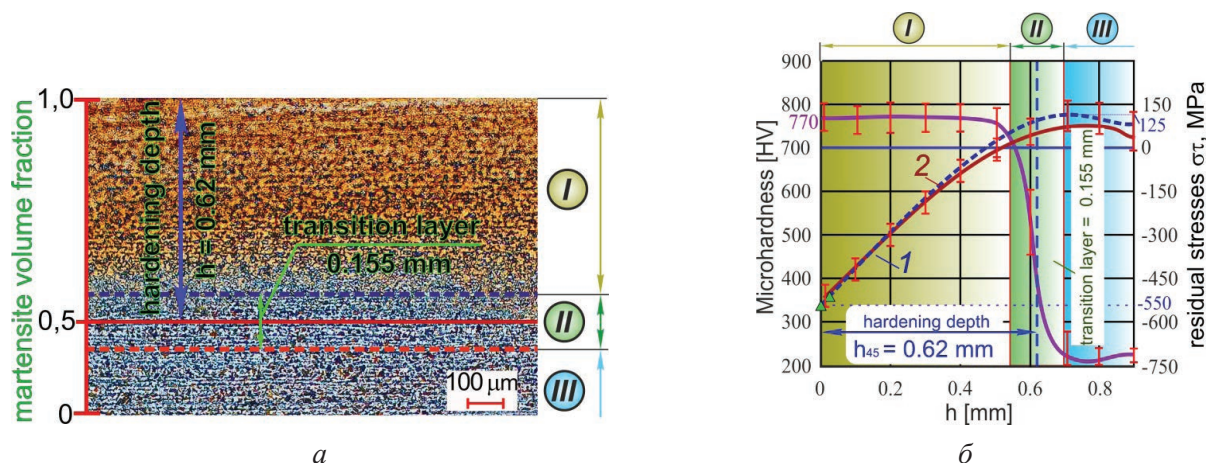


Рис. 14. Результаты экспериментов для деталей, изготовленных из стали 45:

a – оптическая микроскопия; *б* – распределение микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое: 1 – расчетная эпюра тангенциальных остаточных напряжений; 2 – эпюра остаточных напряжений, полученная экспериментально (механическим разрушающим методом); ▲ – остаточные напряжения, полученные рентгеновский метод определения.

Fig. 14. Experimental results for parts made of 45 steel:

a – optical microscopy; *б* – the distribution of microhardness and residual stresses in the surface layer: 1 – is a calculated plot of the tangential residual stresses; 2 – is a plot of residual stresses obtained experimentally (by mechanical destructive method); ▲ – residual stresses obtained by X-ray determination.

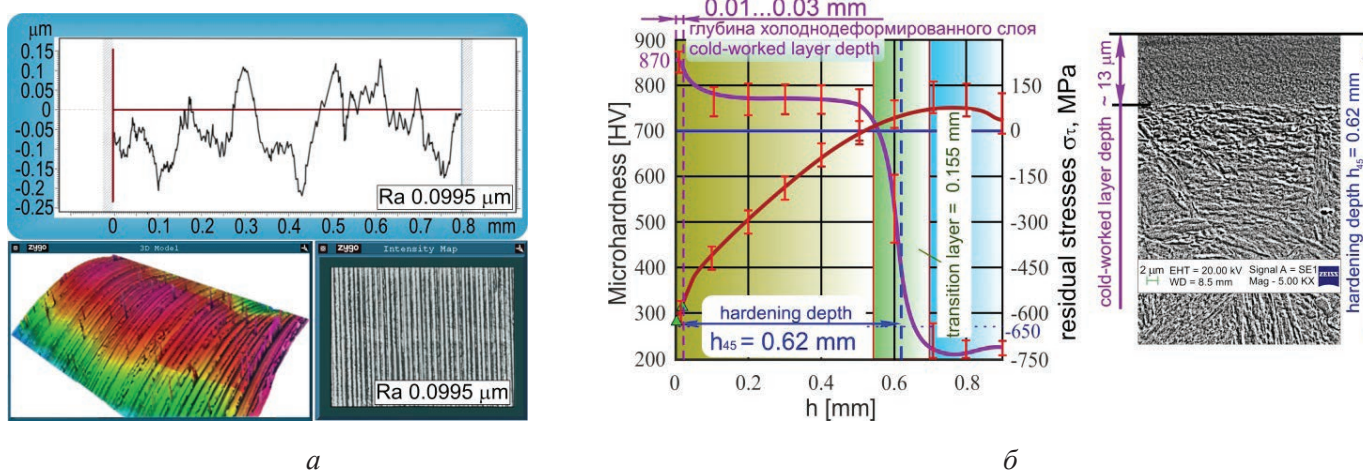


Рис. 15. Качество поверхностного слоя детали после алмазного выглаживания:

a – топография и профилограмма поверхности; *б* – распределение микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое и его микроструктура

Fig. 15. The quality of the surface layer part after diamond smoothing:

a – topography and surface profilogram; *б* – the distribution of microhardness and residual stresses in the surface layer and its microstructure

Список литературы

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

2. The critical raw materials in cutting tools for machining applications: a review / A. Rizzo, S. Goel,

M.L. Grilli, R. Iglesias, L. Jaworska, V. Lapkovskis, P. Novak, B.O. Postolnyi, D. Valerini // Materials. – 2020. – Vol. 13. – P. 1377. – DOI: 10.3390/ma13061377.

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

4. Makris S., Aivaliotis P. Framework for accurate simulation and model-based control of hybrid

- manufacturing processes // *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 97. – P. 470–475. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.07.007.
5. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool // *CIRP Annals. – Manufacturing Technology*. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Hybrid manufacturing based on the combination of mechanical and electro physical-chemical processes / B. Lauwers, N. Chernovol, B. Peeters, D.V. Camp, T.V. Riel, J. Qian // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 95. – P. 649–661. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.11.003.
13. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish / K.R. Berenji, U. Karagüzel, E. Özlü, E. Budak // *CIRP Annals*. – 2019. – Vol. 68, iss. 1. – P. 113–116. – DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.067.
14. Densification, surfacemorphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing / Y. Yang, Y. Gong, S. Qu, Y. Rong, Y. Sun, M. Cai // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 97, iss. 5–8. – P. 2687–2696. – DOI: 10.1007/s00170-018-2144-1.
15. Hybrid laser assisted machining: a new manufacturing technology for ceramic components / G. Guerrini, A. Fortunato, S.N. Melkote, A. Ascari, A.H.A. Lutey // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 74. – P. 761–764. – DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.015.
16. Mirzendehtdel A.M., Behandish M., Nelaturi S. Topology optimization with accessibility constraint for multi-axis machining // *Computer-Aided Design*. – 2020. – Vol. 122. – P. 102825. – DOI: 10.1016/j.cad.2020.102825.
17. Khatir F.A., Sadeghi M.H., Akar S. Investigation of surface integrity in the laser-assisted turning of AISI 4340 hardened steel // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 61. – P. 173–189. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.073.
18. Макаров В.М. Комплексируемые технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // *Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.
19. 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.
20. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebea, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.
21. Liu J., Ye C., Dong Y. Recent development of thermally assisted surface hardening techniques: a review // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. – 2021. – Vol. 2. – P. 100006. – DOI: 10.1016/j.aime.2020.100006.
22. Tailored bainitic-martensitic microstructures by means of inductive surface hardening for AISI4140 / F. Mühl, J. Jarms, D. Kaiser, S. Dietrich, V. Schulze // *Materials and Design*. – 2020. – Vol. 195. – P. 108964. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108964.
23. A review of surface integrity in machining of hardened steels / W.F. Sales, J. Schoop, L.R.R. Silva, Á.R. Machado, I.S. Jawahir // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 58. – P. 136–162. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.040.
24. Combination of high feed turning with cryogenic cooling on Haynes 263 and Inconel 718 superalloys / F.J. Amigo, G. Urbikain, O. Pereira, P. Fernández-Lucio, A. Fernández-Valdivielso, L.N. Lópezde de Lacalle // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 58. – P. 208–222. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.029.
25. 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.
26. 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.

27. 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.

28. 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 978-5-7782-3988-3.

29. 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.

30. 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.

31. Laser transformation hardening of EN24 alloy steel / K.M.B. Karthikeyan, T. Balasubramanian, V. Thillaivanan, G.V. Jangetti // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 22, pt. 4. – P. 3048–3055. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.440.

32. 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.

33. 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.applsc.2020.100030.

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

35. 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.

36. 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, an International Journal. – 2021. – DOI: 10.1016/j.jestch.2021.05.010.

37. 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: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

38. Simulation of induction hardening: simulative sensitivity analysis with respect to material parameters and the surface layer state / F. Mühl, J. Damon, S. Dietrich, V. Schulze // Computational Materials Science. – 2020. – Vol. 184. – P. 109916. – DOI: 10.1016/j.comatsci.2020.109916.

39. 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.

40. Numerical simulation of martensitic transformation plasticity of 42CrMo steel based on spot continual induction hardening model / H. Zhong, Z. Wang, J. Gan, X. Wang, Y. Yang, J. He, T.T. Wei, X. Qin // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 385. – P. 125428. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125428.

41. Головин Г.Ф., Зимин Н.В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. – Л.: Машиностроение, 1990. – 87 с. – ISBN 5-217-00926-8.

42. Шепеляковский К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. – М.: Машиностроение, 1972. – 288 с.

43. Skeebe V.Y., Ivancivsky V.V., Martyushev 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.

44. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, N.V. Martyushev, D.V. Lobanov, N.V. Vakhrushev, A.K. Zhigulev // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 712. – P. 105–111. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

45. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling / V.V. Ivancivsky, V.Yu. Skeebe, I.A. Bataev, D.V. Lobanov, N.V. Martyushev, O.V. Sakha, I.V. Khlebova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156. – Art. 012025. – DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

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

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

48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. 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).
53. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем: монография. – Курск: Курский гос. техн. ун-т, 2010. – 151 с.
54. 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.
55. Вразов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: основы компонетики. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
56. Ивахненко А.Г. Концептуальное проектирование металлорежущих систем. Структурный синтез. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 1998. – 124 с.
57. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2 (59). – С. 33–38.
58. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194, iss. 2. – P. 022037. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.
59. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing” / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeebe // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 25. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.
60. Балакишин Б.С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969. – 560 с.
61. Иващенко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.
62. ASM Handbook. Vol. 9. Metallography and Microstructures / ed. by G.F. Vander Voort. – Materials Park, Ohio, USA: ASM International, 2004. – 1184 p. – ISBN 978-0-87170-706-2.
63. Totten G.E., Howes M., Inoue T. Handbook of residual stress and deformation of steel. – Materials Park, Ohio: ASM International, 2002. – 499 p. – ISBN 978-0-87170-729-1.
64. Springer handbook of experimental solid mechanics / ed. by W.N. Sharpe. – Leipzig; New York: Springer Science and Business Media, 2008. – 1098 p. – ISBN 978-0-387-26883-5.
65. Головин Г.Ф., Замятин М.М. Высокочастотная термическая обработка: вопросы металлостроения и технологии. – Л.: Машиностроение, 1990. – 239 с.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 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



Improving the efficiency of surface-thermal hardening of machine parts in conditions of combination of processing technologies, integrated on a single machine tool base

Vadim Skeebea ^{a, *}, Vladimir Ivancivsky ^b

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

^a <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebea_vadim@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-9244-225X>, ivancivskij@corp.nstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 May 2021

Revised: 14 June 2021

Accepted: 07 August 2021

Available online: 15 September 2021

Keywords:

Hybrid equipment
High energy heating
Machining
Induction hardening
Conceptual design

Funding

The research was funded by RFBR and Novosibirsk region, project number 20-48-540016.

Acknowledgements

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

ABSTRACT

Introduction. In the manufacturing industry, there is a particular interest in the development of a new type of technological equipment, which makes it possible to implement methods for modifying the parts surface layers by processing it with concentrated energy sources. The combination of two processing technologies (mechanical and surface-thermal operations) in the conditions of integrated equipment makes it possible to neutralize the disadvantages of monotecnologies and obtain new effects that are unattainable when using technologies separately. The use of hybrid machine tools in conjunction with the developed technological recommendations will allow achieving a multiple increase in the technical and economic efficiency of production, resource and energy saving, which in turn will contribute to an increase in the competitiveness of products and the renewal of the technological paradigm. **Purpose of work:** increasing productivity and reducing energy consumption during surface-thermal hardening of machine parts by exposure to concentrated energy sources under conditions of integrated processing. **Theory and methods:** studies of the possible structural composition and layout of hybrid equipment during the integration of mechanical and surface-thermal processes are carried out taking into account the main provisions of structural synthesis and the components of metalworking systems. Theoretical studies are carried out using the basic provisions of system analysis, geometric theory of surface formation, design of metalworking machines, finite-element method, mathematical and computer simulation. Mathematical simulation of thermal fields and structural-phase transformations in the case of HEH HFC is carried out in the ANSYS and SYSWELD software packages, using numerical methods for solving the differential equations of unsteady thermal conductivity (Fourier's equation), carbon diffusion (Fick's second law), and elastoplastic behavior of the material. The verification of the simulation results is carried out by conducting field experiments using: optical and scanning microscopy; mechanical and X-ray methods for determining residual stresses. In the study, Uone JD520 and Form Talysurf Series 2 profilograph-profilometers are used to simultaneously measure shape deviations, waviness and surface roughness. Surface topography is assessed using a Zygo New View 7300 laser profilograph-profilometer. The microhardness of the hardened surface layer of parts is evaluated on a Wolpert Group 402MVD device. **Results and discussion.** An original method of structural-kinematic analysis for pre-design research of hybrid metalworking equipment is presented. Methodological recommendations are developed for the modernization of metal-cutting machine tools, the implementation of which will allow the implementation of high-energy heating by high-frequency currents (HEH HFC) on a standard machine-tool system and ensure the formation of high-tech technological equipment with expanded functionality. A unified integral parameter of the temperature-time effect on a structural material is proposed when the modes of hardening by concentrated heating sources are assigned, which guarantee the required set of quality indicators of the surface layer of machine parts, while ensuring energy efficiency and processing productivity in general. It is experimentally confirmed that the introduction into production of the proposed hybrid machine tool in conjunction with the developed recommendations for the purpose of the HEH HFC modes in the conditions of integral processing of a "Plunger bushing" type part in relation to the factory technology allows increasing the productivity of surface hardening by 3.5...4.1 times, and reduce energy consumption by 9.5...11.3 times.

For citation: Skeebea V.Yu., Ivancivsky V.V. Improving the efficiency of surface-thermal 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: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-45-71. (In Russian).

* Corresponding author

Skeebea Vadim Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 Novosibirsk, 630073, Russian Federation
 Tel: 8 (383) 346-17-79, e-mail: skeebea_vadim@mail.ru

References

1. Brecher C., Özdemir D. *Integrative production technology: theory and applications*. Springer International Publ., 2017. 1100 p. DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6. ISBN 978-3-319-47451-9. ISBN 978-3-319-47452-6.
2. Rizzo A., Goel S., Grilli K.M., Iglesias R., Jaworska L., Lapkovskis V., Novak P., Postolnyi B.O., Valerini D. The critical raw materials in cutting tools for machining applications: a review. *Materials*, 2020, vol. 13, p. 1377. DOI: 10.3390/ma13061377.
3. 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.
4. Makris S., Aivaliotis P. Framework for accurate simulation and model-based control of hybrid manufacturing processes. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 97, pp. 470–475. DOI: 10.1016/j.procir.2020.07.007.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Lauwers B., Chernovol N., Peeters B., Camp D.V., Riel T.V., Qian J. Hybrid manufacturing based on the combination of mechanical and electro physical–chemical processes. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 95, pp. 649–661. DOI: 10.1016/j.procir.2020.11.003.
13. Berenji K.R., Karagüzel U., Özlü E., Budak E. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish. *CIRP Annals*, 2019, vol. 68, iss. 1, pp. 113–116. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.067.
14. Yang Y., Gong Y., Qu S., Rong Y., Sun Y., Cai M. Densification, surface morphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, iss. 5–8, pp. 2687–2696. DOI: 10.1007/s00170-018-2144-1.
15. Guerrini G., Fortunato A., Melkote S.N., Ascari A., Lutey A.H.A. Hybrid laser assisted machining: a new manufacturing technology for ceramic components. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 74, pp. 761–764. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.015.
16. Mirzendehtdel A.M., Behandish M., Nelaturi S. Topology optimization with accessibility constraint for multi-axis machining. *Computer-Aided Design*, 2020, vol. 122, p. 102825. DOI: 10.1016/j.cad.2020.102825.
17. Khatir F.A., Sadeghi M.H., Akar S. Investigation of surface integrity in the laser-assisted turning of AISI 4340 hardened steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 61, pp. 173–189. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.073.
18. Makarov V.M. Kompleksirovannyye 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.
19. 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.
20. Skeebe V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12, pp. 1408–1411. DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.
21. Liu J., Ye C., Dong Y. Recent development of thermally assisted surface hardening techniques: a review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2021, vol. 2, p. 100006. DOI: 10.1016/j.aime.2020.100006.
22. Mühl F., Jarms J., Kaiser D., Dietrich S., Schulze V. Tailored bainitic-martensitic microstructures by means of inductive surface hardening for AISI4140. *Materials and Design*, 2020, vol. 195, p. 108964. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108964.

23. Sales W.F., Schoop J., Silva L.R.R., Machado Á.R., Jawahir I.S. A review of surface integrity in machining of hardened steels. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 136–162. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.040.
24. Amigo F.J., Urbikain G., Pereira O., Fernández-Lucio P., Fernández-Valdivielso A., López de Lacalle L.N. Combination of high feed turning with cryogenic cooling on Haynes 263 and Inconel 718 superalloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 208–222. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.029.
25. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Gibridnaya tekhnologiya elektrokhimicheskoi obrabotki slozhnoprofil'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.
26. 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.
27. Skeebe V.Yu., Ivantsivsky V.V. *Gibridnoe 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 978-5-7782-3690-5.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. Karthikeyan K.M.B., Balasubramanian T., Thillaivanan V., Jangetti G.V. Laser transformation hardening of EN24 alloy steel. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 22, pt. 4, pp. 3048–3055. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.440.
32. 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.
33. 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.applsc.2020.100030.
34. 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.
35. 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.
36. 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, an International Journal*, 2021. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.05.010.
37. 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.
38. Mühl F., Damon J., Dietrich S., Schulze V. Simulation of induction hardening: simulative sensitivity analysis with respect to material parameters and the surface layer state. *Computational Materials Science*, 2020, vol. 184, p. 109916. DOI: 10.1016/j.commatsci.2020.109916.
39. 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.

40. Zhong H., Wang Z., Gan J., Wang X., Yang Y., He J., Wei T.T., Qin X. Numerical simulation of martensitic transformation plasticity of 42CrMo steel based on spot continual induction hardening model. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 385, p. 125428. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125428.
41. Golovin G.F., Zimin N.V. *Tekhnologiya termicheskoi obrabotki metallov s primeneniem induktsionnogo nagreva* [Heat treatment technology of metals using induction heating]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1990. 87 p. ISBN 5-217-00926-8.
42. Shepelyakovskii K.Z. *Uprochnenie detalei mashin poverkhnostnoi zakalkoi pri induktsionnom nagreve* [Hardening of machine parts by surface hardening during induction heating]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 288 p.
43. Skeebe V.Y., Ivancivsky V.V., Martyushev 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.
44. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V., Lobanov D.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 105–111. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.
45. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Bataev I.A., Lobanov D.V., Martyushev N.V., Sakha O.V., Khlebova I.V. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156, p. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.
46. Fedotenok A.A. *Kinematicheskaya struktura metallovezhushchikh stankov* [Kinematic structure of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 408 p.
47. 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.
48. 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.
49. 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.
50. Nakaminami M., Tokuma T., Moriwaki M., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multi-axis 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.
51. Nakaminami M., Tokuma T., Matsumoto K., Sakashita S., Moriwaki T., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multi-axis 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.
52. 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.
53. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. *Strukturno-parametricheskii sintez tekhnologicheskikh sistem* [Structural-parametric synthesis of technological systems]. Kursk, KurskSTU Publ., 2010. 151 p.
54. 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.
55. Vragov Yu.D. *Analiz komponovok metallovezhushchikh stankov (Osnovy komponetiki)* [Analysis of the layout of machine tools. The basics of compositing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 208 p.
56. Ivakhnenko A.G. *Kontseptual'noe proektirovanie metallovezhushchikh sistem. Strukturnyi sintez* [Conceptual design of metal-cutting systems. Structural synthesis]. Khabarovsk, KhGTU Publ., 1998. 124 p.
57. Ptitsyn S.V., Skeebe V.Yu., Chesov Yu.S., Merezhko E.V. Nadezhnost' prognoza kachestva tekhnologicheskogo oborudovaniya [Reliability prediction of quality process equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2013, no. 2 (59), pp. 33–38.
58. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, iss. 2, p. 022037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

59. 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.
60. Balakshin B.S. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Fundamentals of mechanical engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 560 p.
61. Ivashchenko I.A. *Tekhnologicheskie razmernye raschety i sposoby ikh avtomatizatsii* [Technological dimensional calculations and methods of their automation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 222 p.
62. Vander Voort G.F., ed. *ASM Handbook. Vol. 9. Metallography and Microstructures*. Materials Park, Ohio, USA, ASM International, 2004. 1184 p. ISBN 978-0-87170-706-2.
63. Totten G.E., Howes M., Inoue T. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, Ohio, USA, ASM International, 2002. 499 p. ISBN 978-0-87170-729-1.
64. 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.
65. Golovin G.F., Zamyatnin M.M. *Vysokochastotnaya termicheskaya obrabotka: voprosy metallovedeniya i tekhnologii* [High-frequency heat treatment: questions of metal science and technology]. Leningrad, Mashinostroe-
nie Publ., 1990. 239 p.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2021 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/>).