

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ*

*В.Ю. СКИБА, канд. техн. наук, доцент
В.Н. ПУШНИН, аспирант
Д.Ю. КОРНЕВ, магистр
К.А. ПАРЦ, студентка
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 1 июня 2015

Рецензирование 2 июля 2015

Принята к печати 27 июля 2015

Скиба В.Ю. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Цель: Формирование требуемых эксплуатационных характеристик деталей машин в основном обеспечивается на завершающей стадии технологического процесса их производства. В связи с этим ставится задача исследовать особенности обеспечения параметров качества поверхностного слоя изделий, достигаемых на последнем переходе – алмазном выглаживании – комплексированной обработки. **Методы:** Эксперименты проводились на токарном станке, оснащённом дополнительным источником энергии, в качестве которого использовался выносной закалочный контур, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты. Структурные исследования производили с применением оптической и растровой микроскопии. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя детали оценивали посредством механического и рентгеновского методов определения остаточных напряжений. Оценку шероховатости поверхности производили на профилограф-профилометрах Form Talysurf Series 2 и Zygo New View 7300. **Результаты и об-суждение:** Установлено, что при алмазном выглаживании образцов из стали 45 в условиях предложенного принципа интегрирования, позволяющего осуществить обработку деталей от одной технологической базы, становится возможным повысить поверхностную микротвёрдость и уровень остаточных напряжений сжатия, достигнутых на переходе поверхностной закалки токами высокой частоты. Экспериментально подтверждено, что после алмазного выглаживания в поверхностно-закалённом образце формируется упрочнённый (наклепанный) слой толщиной 0,01...0,02 мм, микротвёрдость которого составляет ~ 868 HV, при этом уровень сжимающих напряжений в поверхностном слое возрастает до значений $\sigma_{\tau} = -678 \pm 20$ МПа. Определён рациональный диапазон изменения силы выглаживания $P_y \in [100; 150]$ Н, в котором гарантировано минимальное значение параметра шероховатости $Ra = 0,18 \pm 0,08$ мкм. Получены функциональные зависимости параметра Ra от режимов обработки, которые можно рекомендовать к использованию при назначении режимов алмазного выглаживания исходя из обеспечения высокой производительности и требуемой шероховатости поверхности.

Ключевые слова: комплексирование, алмазное выглаживание, режимы обработки, шероховатость, твёрдость, остаточные напряжения.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-31-41

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта, выполняемого в рамках гранта РФФИ в 2015 г. и в плановом периоде в 2013–2015 гг. (Номер проекта 13-08-01102 А «Проектно-исследовательская разработка технологической установки для плазменно-механической обработки деталей машин»).

Введение

Обеспечение выпуска конкурентоспособной и качественной продукции является основным направлением развития современного машиностроения. В связи с этим в станкостроении отчетливо наблюдается особый интерес к разработке нового типа технологического оборудования – гибридных обрабатывающих комплексов, обладающих полифункциональными возможностями [1–6]. Комплексирование различных процессов в одном станке: лазерная поверхностная закалка в сочетании с механической обработкой [7, 8], абразивное шлифование – поверхностная закалка [9–11], резание – закалка [12], точение – шлифование, обусловлено стремлением разработчиков к расширению технологических возможностей станков и обеспечение их автономной работы в гибком машиностроительном производстве [13, 14]. Данный прием позволяет не только достигнуть высоких показателей ресурсо- и энергосбережения, но и обеспечить соответствующий уровень производительности обработки и качества детали [15]: точности формы, размеров и взаимного расположения поверхностей, шероховатости и заданных физико-механических свойств поверхностных слоев и материала.

Объектом данных исследований является технологический процесс изготовления деталей машин, состоящий из операций: предварительная механическая обработка (черновое точение), поверхностная закалка (высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты) и финишная механическая обработка (чистовое точение и алмазное выглаживание).

Поскольку именно финишные операции формируют в поверхностном слое детали оптимальное сочетание параметров качества (шероховатость, величина и характер распределения микротвердости и остаточных напряжений, микроструктура поверхностного слоя и др.), определяющих эксплуатационные характеристики изделия [16–20], то целью работы является исследование качества поверх-

ностного слоя, достигаемое при алмазном выглаживании в условиях комплексированной обработки.

Методика экспериментального исследования

В качестве образцов использовался цилиндрический прут (рис. 1) (диаметр $d = 50$ мм, длина $l = 70$ мм), изготовленный из стали 45. Состав исходного материала проверялся оптико-эмиссионным спектрометром ARL 3460. Результаты анализа представлены в таблице.

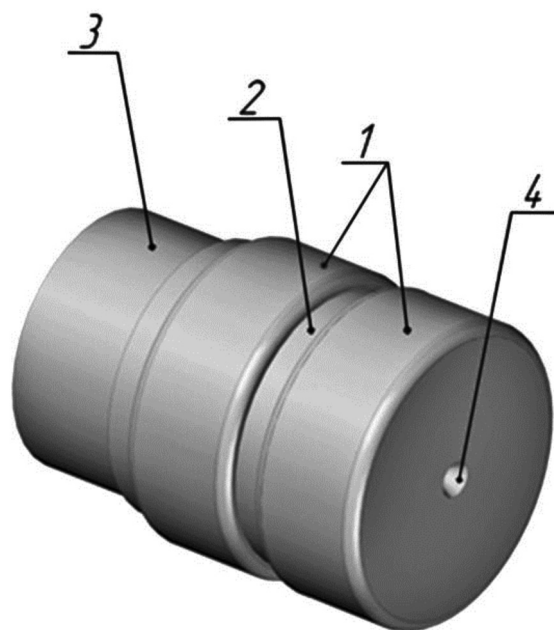


Рис. 1. Исследуемый образец:

1 – обрабатываемые поверхности (по 20 мм); 2 – разделительная канавка (5 мм); 3 – шейка для закрепления (20 мм); 4 – отверстие центровое

Химический состав исходного материала

Материал	Массовая доля элемента, %							
	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

Для интеграции процессов механической и поверхностной термической обработок была произведена модернизация токарно-винторезного станка модели УТ16ПМ, заключающаяся в оснащении станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии, в качестве которого использован выносной закалочный контур, реализующий высокоэнергетический нагрев токами высокой частоты

(ВЭНТВЧ), характеризующийся высоким термическим коэффициентом полезного действия. В качестве источника энергии использовали генератор ВЧГ 6 – 60/0,44 с рабочей частотой тока $\omega = 440 \cdot 10^3$ Гц.

При токарной обработке, закалке ВЭН ТВЧ и алмазном выглаживании закрепление образца осуществлялось в трёхкулачковом патроне с поджатием центром задней бабки станка.

Черновое точение осуществлялось проходным резцом с СМП (материал режущей пластины Т15К6) на следующих режимах: $V_d \approx 92$ м/мин ($n_d = 588$ 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 [21, 22]. Исследования проводились при использовании интенсивного водяного душевого охлаждения поверхности в следующем диапазоне режимов обработки: удельная мощность источника $q_{\text{и}} = (1,5 - 4,0) \cdot 10^8$ Вт/м², скорость перемещения детали под индуктором $V_d = (0,05...0,1)$ м/с (соответствует $n_d = 19,9...39,8$ мин⁻¹). Ширина активного провода индуктора составляла $B_{\text{и}} = 2$ мм, обработка осуществлялась с зазором $\Delta = 0,1...0,2$ мм.

Чистовое точение производилось проходным резцом с СМП (материал сменной пластины – оксикарбидная керамика на основе композиции Al₂O₃-TiC). Режимы резания: $V_d \approx 133$ 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 осерненное минеральное масло «Сульфозфрезол».

Алмазное выглаживание осуществлялось по двухпроходной схеме при использовании спроектированной и изготовленной державки с упругой головкой, в которую устанавливались алмазные наконечники (ТУ2-037-631-88) радиусом $R = 1$ мм. Радиальная составляющая силы выглаживания P_y с учетом жесткости данного технологического оборудования, твердости поверхностного слоя обрабатываемой детали после поверхностной закалки ВЭН ТВЧ (HV = 700...800) и радиуса алмазной сферы соответственно была равна: 50, 100, 150, 200 Н. При

этом окружная скорость заготовки составляла $V_{\text{выгл}} = 25,3; 33,2; 41,9$ м/мин ($n_d = 168; 220; 278$ мин⁻¹); а величины подачи – $S_{o \text{ выгл}} = 0,018...0,08$ мм/об. В качестве СОТС при алмазном выглаживании использовалось индустриальное масло марки И-20А.

Структурные исследования образцов были проведены на оптическом микроскопе *Carl Zeiss Axio Observer Z1m* и на 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 [23].

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 [24, 25]. Для выявления дефектов поверхностного слоя на каждом переходе использовались: визуально-оптический метод с применением микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer A1m*, капиллярный метод, токовихревой метод с применением вихретокового дефектоскопа ВД – 70. В исследовании для одновременного измерения отклонений формы, волнистости и шероховатости поверхности применялся профилограф-профилометр *Form Talysurf Series 2* фирмы *Taylor Hobson*. Оценку топографии поверхности производили на лазерном профилографе-профилометре *Zygo New View 7300*.

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

Результаты и обсуждение

Исследования качества поверхности после первого перехода интегральной обработки показали, что в процесс чернового точения формируется бездефектная поверхность, значение шероховатости которой по параметру Ra составляет $3,3 \pm 0,7$ мкм.

На втором переходе – поверхностная закалка ВЭН ТВЧ – при обеспечении требуемой глубины упрочнения $h = 0,6$ мм и рационального характера распределения остаточных напряжений определение удельной мощности ($q_{\text{и}}$ [Вт/м²]) и скорости перемещения источника ($V_{\text{д}}$ [м/с]) осуществлялось посредством решения системы уравнений $h(q_{\text{и}}, V_{\text{д}})$ и $\Psi(q_{\text{и}}, V_{\text{д}})$ [26, 27]:

$$\begin{cases} h(q_{\text{и}}, V_{\text{д}}) = a + bV_{\text{д}} + cq_{\text{и}} + dV_{\text{д}}^2 + eq_{\text{и}}^2 + \\ + fV_{\text{д}}q_{\text{и}} + gV_{\text{д}}^3 + hq_{\text{и}}^3 + iV_{\text{д}}q_{\text{и}}^2 + jV_{\text{д}}^2q_{\text{и}}, \\ \Psi(q_{\text{и}}, V_{\text{д}}) = k + lV_{\text{д}} + mq_{\text{и}} + nV_{\text{д}}^2 + oq_{\text{и}}^2 + \\ + pV_{\text{д}}q_{\text{и}} + rV_{\text{д}}^3 + sq_{\text{и}}^3 + tV_{\text{д}}q_{\text{и}}^2 + uV_{\text{д}}^2q_{\text{и}}, \\ 0,25 \leq \Psi(q_{\text{и}}, V_{\text{д}}) \leq 0,35, \end{cases}$$

где $a = 0,426008$; $b = 2,827121$; $c = 3,025072 \cdot 10^{-9}$; $d = -301,591960$; $e = -4,694423 \cdot 10^{-18}$; $f = 3,600666 \cdot 10^{-8}$; $g = 1953,668810$; $h = 3,216427 \cdot 10^{-27}$; $i = 1,375401 \cdot 10^{-17}$; $j = -3,779403 \cdot 10^{-7}$; $k = 0,087564$; $l = -7,429933$; $m = 1,062284 \cdot 10^{-8}$; $n = 235,19293$; $o = -3,424286 \cdot 10^{-17}$; $p = -8,850919 \cdot 10^{-8}$; $r = -1309,3045$; $s = 2,9423 \cdot 10^{-26}$; $t = 1,403793 \cdot 10^{-16}$; $u = 1,010925 \cdot 10^{-7}$ – значения коэффициентов функциональных зависимостей для стали 45.

На рис. 2 представлено графическое решение данной задачи. При закалке стали 45 на глубину 0,6 мм диапазон рекомендуемых режимов ограничен на кривой точками *A* и *B*: при этом $q_{\text{и}} = (3,0 \dots 3,4) \cdot 10^8$ Вт/м², $V_{\text{д}} = (0,072 \dots 0,081)$ м/с. Найденные режимы обработки (заштрихованная область) гарантируют получение необходимой глубины закалки и рациональную величину переходной зоны.

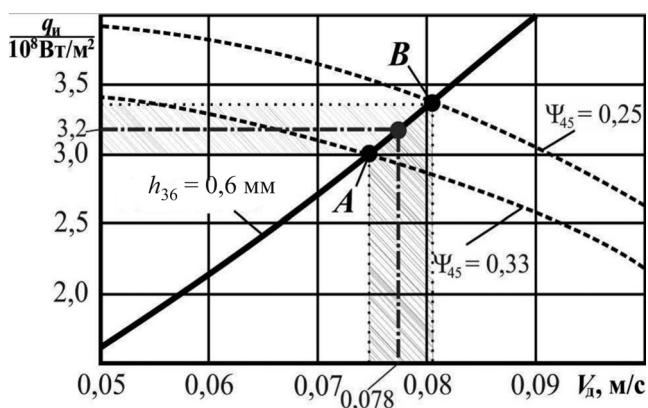


Рис. 2. Зависимость удельной мощности источника от его скорости движения при закалке ВЭН ТВЧ стали 45 на глубину $h_{45} = 0,6$ мм

Настройку станочного оборудования производили на следующие режимы: $q_{\text{и}} = 3,2 \cdot 10^8$ Вт/м² и $V_{\text{д}} = 0,078$ м/с ($n_{\text{д}} \approx 31$ мин⁻¹). Для обеспечения требуемой частоты вращения шпинделя была произведена модернизация привода главного движения, заключающаяся в его оснащении частотным преобразователем *HF Inverter model F1500-G0015S2B*.

Характер распределения микротвердости образцов в поперечном сечении отражен на рис. 3. Микроструктура упрочненного слоя стали 45 представлена на рис. 4, *a*. Она представляет собой мартенсит и незначительное количество мелких ферритных зерен размерами до 10 мкм. Средний уровень микротвердости закаленного слоя после ВЭНТВЧ составил 739 HV, при этом микротвердость материала основы находилась на уровне 204 HV. Микроструктура переходной зоны около основного металла представляет собой зерна феррита размерами 20...30 мкм и низкоуглеродистый мартенсит (рис. 4, *б*). Ширина этой зоны ~0,17 мм. Наличие феррита и его строчечное расположение (как и в основном металле) свидетельствуют о том, что температура нагрева этой области находилась в интервале Ac_1 – Ac_3 .

Распределение тангенциальных остаточных напряжений (ОН) по глубине упрочненного слоя представлено на рис. 5. Максимальный уровень сжимающих ОН на поверхности составил $\sigma_{\text{т}} = -560 \pm 20$ МПа. При этом пик растягивающих

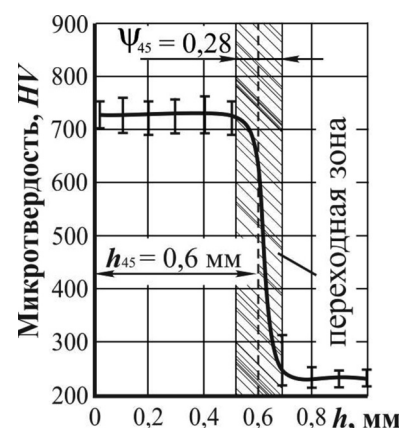
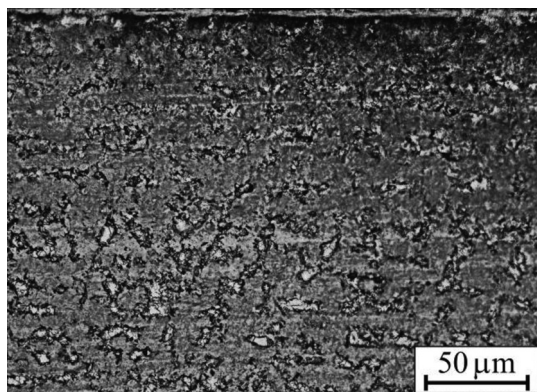
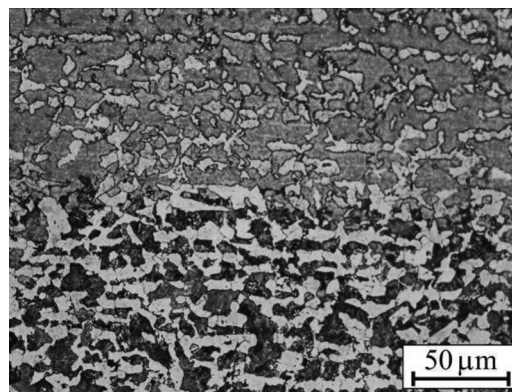


Рис. 3. Распределение микротвердости в поверхностном слое стали 45 после закалки ВЭН ТВЧ:

режим – $q_{\text{и}} = 3,2 \cdot 10^8$ Вт/м²,
 $V_{\text{д}} = 0,078$ м/с, $B_{\text{и}} = 2$ мм



а



б

Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя стали 45 после поверхностной закалки ВЭН ТВЧ:

а – участок закаленного слоя; б – участок переходной зоны

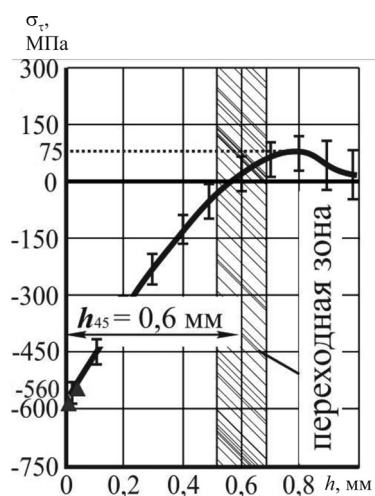


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое стали 45 после закалки ВЭН ТВЧ:

режим – $q_n = 3,2 \cdot 10^8$ Вт/м², $V_d = 0,078$ м/с, $B_n = 2$ мм; ▲ – остаточные напряжения, полученные рентгеновский методом определения

напряжений достиг уровня $\sigma_\tau = 75 \pm 45$ МПа и находится на глубине $\sim 0,8$ мм.

Чистовое точение осуществлялось в размер детали $d = 48$ мм, при этом значение шероховатости поверхности по параметру Ra составляло $1,2 \pm 0,2$ мкм. Поверхностная микротвердость и остаточные напряжения находились на уровне, достигнутом на переходе ВЭН ТВЧ.

В процессе алмазного выглаживания формируется пластически деформированная поверхность, топография которой характеризуется округлой формой микрорельефа, без задигов и вырывов.

На рис. 6 представлены зависимости влияния скорости $V_{\text{выгл}}$ и подачи $S_{\text{о выгл}}$ на параметр шероховатости Ra при различных значениях силы выглаживания P_y . Как видно из рисунков, увеличение $V_{\text{выгл}}$ и $S_{\text{о выгл}}$ в исследуемых диапазонах изменения режимных параметров приводит к повышению шероховатости поверхности. В большей степени оказывает свое влияние на рост микронеровностей именно изменение величины подачи $S_{\text{о выгл}}$.

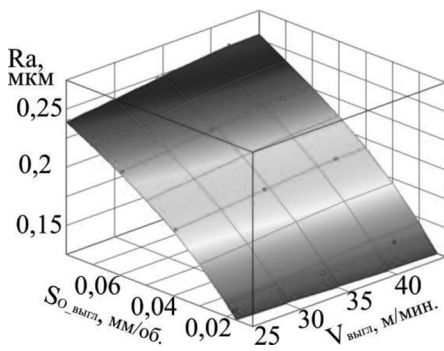
При исследовании влияния силы выглаживания было выявлено, что на участке от 50 Н до 100 Н наблюдается интенсивное уменьшение параметра шероховатости Ra (рис. 7). В интервале [100Н; 150Н] стабилизируется значение параметра Ra на уровне $0,18 \pm 0,08$ мкм: исходные микронеровности практически полностью нивелируются и шероховатость поверхности зависит только от параметров $V_{\text{выгл}}$ и $S_{\text{о выгл}}$. Для значений $P_y = 100$ Н и $P_y = 150$ Н была определена функциональная зависимость Ra ($V_{\text{выгл}}$; $S_{\text{о выгл}}$):

$$\begin{aligned} \text{Ra}(V_{\text{выгл}}, S_{\text{о выгл}}) = & a + bV_{\text{выгл}} + \\ & + cS_{\text{о выгл}} + dV_{\text{выгл}}^2 + eS_{\text{о выгл}}^2 \\ & + fV_{\text{выгл}}S_{\text{о выгл}} + gV_{\text{выгл}}^3 + hS_{\text{о выгл}}^3 + \\ & + iV_{\text{выгл}}S_{\text{о выгл}}^2 + jV_{\text{выгл}}^2S_{\text{о выгл}}, \end{aligned}$$

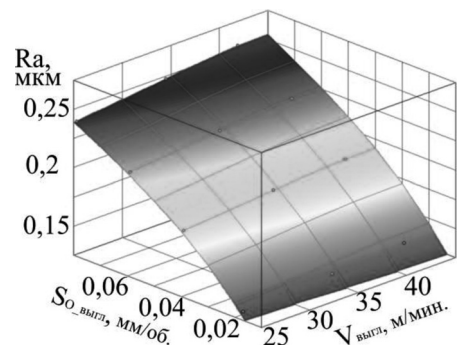
где

для $P_y = 100$ Н:

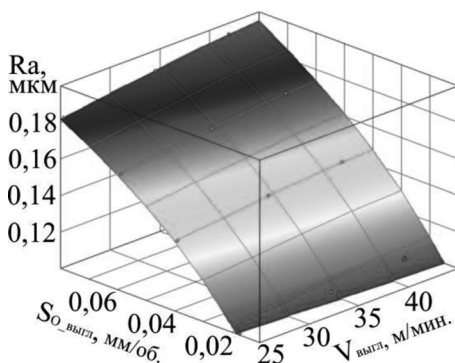
$$\begin{aligned} a = 0,098931, \quad b = -0,00422, \quad c = 2,512088, \\ d = 0,000135, \quad e = -23,857743, \quad f = 0,020124, \\ g = -1,326322 \times 10^{-6}, \quad h = 105,49039, \quad i = -0,028432, \\ j = -0,000193; \end{aligned}$$



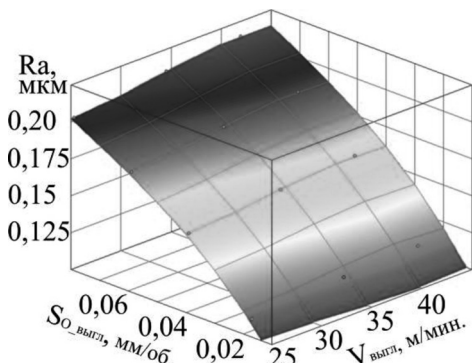
a



б



в



г

Рис. 6. Зависимости параметра шероховатости Ra от скорости резания $V_{\text{выгл}}$ и подачи $S_{\text{о выгл}}$ при постоянных значениях силы выглаживания:

$a - P_y = 50 \text{ Н}$; $б - P_y = 100 \text{ Н}$; $в - P_y = 150 \text{ Н}$; $г - P_y = 200 \text{ Н}$

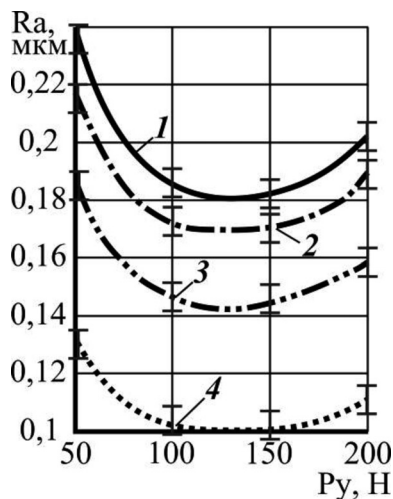


Рис. 7. Зависимость параметра шероховатости Ra от силы выглаживания P_y :

1 – $V_{\text{выгл}} = 25,3 \text{ м/мин}$, $S_{\text{о выгл}} = 0,08 \text{ мм/об}$; 2 – $V_{\text{выгл}} = 33,2 \text{ м/мин}$, $S_{\text{о выгл}} = 0,06 \text{ мм/об}$; 3 – $V_{\text{выгл}} = 33,2 \text{ м/мин}$, $S_{\text{о выгл}} = 0,04 \text{ мм/об}$; 4 – $V_{\text{выгл}} = 25,3 \text{ м/мин}$, $S_{\text{о выгл}} = 0,018 \text{ мм/об}$

для $P_y = 150 \text{ Н}$:

$a = 0,070639$, $b = -0,002061$, $c = 2,729073$,
 $d = 7,897542 \times 10^{-5}$, $e = -23,406582$, $f = 0,005446$,
 $g = -8,396753 \times 10^{-7}$, $h = 92,631383$, $i = -0,001955$,
 $j = -1,421271 \times 10^{-5}$.

Дальнейшее повышение значений P_y способствует только увеличению параметра Ra . Данные результаты хорошо согласуются с материалами, представленными в [28–30].

Минимальное значение параметра шероховатости Ra , которое было зафиксировано при обработке на режимах $V_{\text{выгл}} = 25,3 \text{ м/мин}$; $S_{\text{о выгл}} = 0,018 \text{ мм/об}$; $P_y = 150 \text{ Н}$, составляло $\sim 0,1 \text{ мкм}$ (рис. 8). Структурные исследования на растровом электронном микроскопе показали, что в процессе алмазного выглаживания в поверхностно закаленном образце формируется упрочненный (наклепанный) слой толщиной $0,01 \dots 0,02 \text{ мм}$ (рис. 9). При этом происходит повышение микротвердости и увеличение уровня сжимающих напряжений в поверхностном слое до значений 868 НВ и $\sigma_{\tau} = -678 \pm 20 \text{ МПа}$ соответственно (рис. 10).

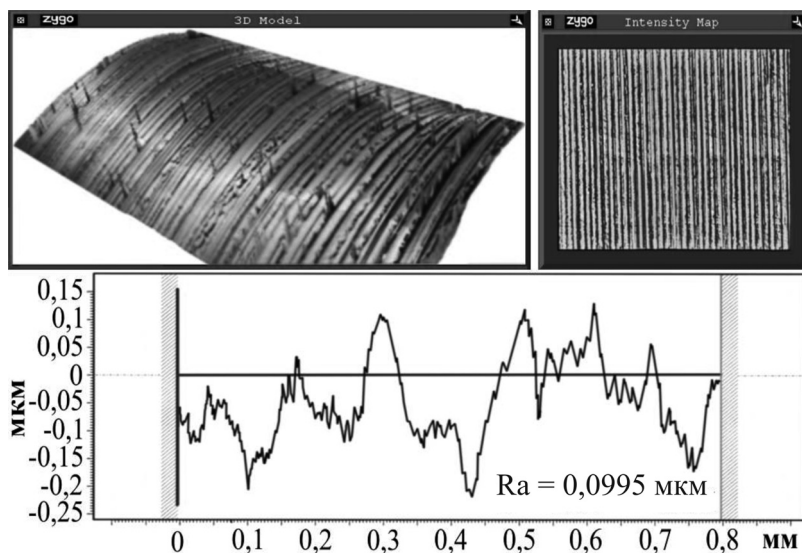


Рис. 8. Топография и профилограмма поверхности детали после алмазного выглаживания:

$$V_{\text{выгл}} = 25,3 \text{ м/мин}; S_{\text{о выгл}} = 0,018 \text{ мм/об.}; P_y = 150 \text{ Н}; R = 1 \text{ мм}; \\ Ra_{\text{исх}} = 1,2 \pm 0,2 \text{ мкм}; HV_{\text{исх}} = 739$$

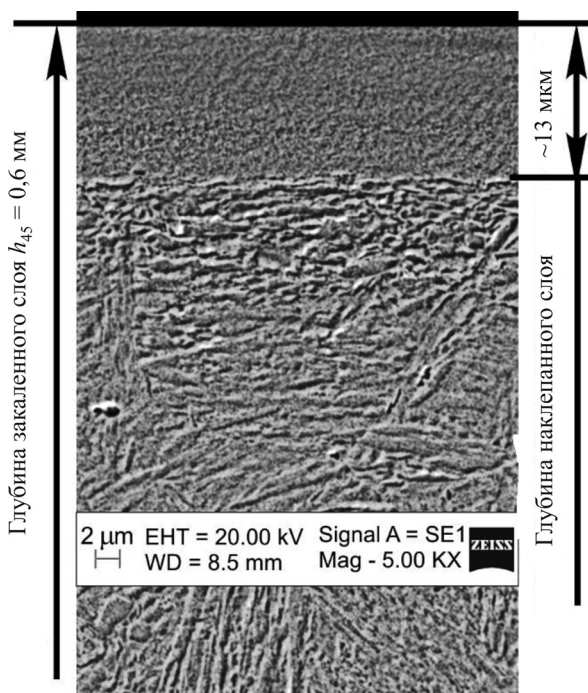


Рис. 9. Микроструктура поверхностного слоя после алмазного выглаживания

Выводы

Проведенные исследования показали, что алмазное выглаживание, выполняемое в рамках интегрированной обработки, позволяет существенно повысить качество поверхностного слоя деталей машин. Экспериментально установлено, что при выполнении завершающего

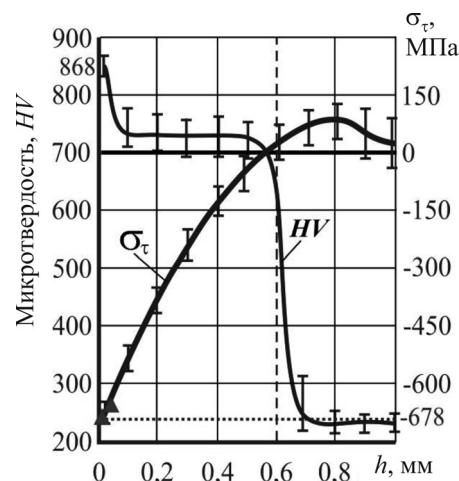


Рис. 10. Распределение микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое стали 45 после алмазного выглаживания:

▲ — остаточные напряжения, полученные рентгеновский методом определения

перехода по отношению к переходу ВЭН ТВЧ становится возможным повысить поверхностную микротвердость и уровень остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое изделия на ~15...20 %. Выявлено, что после алмазного выглаживания в поверхностно-закаленном образце формируется наклепанный слой толщиной 0,01...0,02 мм, микротвердость которого состав-

ляет ~868 HV, при этом уровень сжимающих напряжений в поверхностном слое возрастает до значений и $\sigma_{\tau} = -678 \pm 20$ МПа. Определен рациональный диапазон изменения силы выглаживания $P_y \in [100 \text{ Н}; 150 \text{ Н}]$, в котором гарантировано минимальное значение параметра шероховатости $Ra = 0,18 \pm 0,08$ мкм. Полученная функциональная зависимость $Ra(V_{\text{выгл}}, S_{\text{о выгл}})$ позволит назначать режимы алмазного выглаживания исходя из обеспечения высокой производительности и требуемой шероховатости поверхности.

Список литературы

1. Макаров В.М. Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.
2. 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.
3. 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.
4. Nagae A. Development trend of multi-tasking machines // Proceedings of the 11th International Conference on Machine Tool Engineers, Tokyo, Japan, November 3–5, 2004. – Tokyo, 2004. – P. 312–323.
5. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebe, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.
6. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. McIntosh // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 63, iss. 2. – P. 561–583. – doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
7. Multi-technology platform for hybrid metal processing / C. Brecher, F. Hoffmann, A. Karlberger, C.-J. Rosen // Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, Tokyo, Japan, May 26–28, 2008. – Tokyo, 2008. – P. 425–428. – doi: 10.1007/978-1-84800-267-8_87.
8. 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.
9. Скиба В.Ю. Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2008. – 257 с.
10. Методика назначения режимов обработки при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ / В.В. Иванцовский, В.Ю. Скиба, Н.П. Зуб, С.В. Туревич // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора Муханова И.И.: сборник трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 84–93.
11. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю. Эффективность объединения операций поверхностной закалки и шлифования на одном технологическом оборудовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 4 (49). – С. 15–21.
12. Salonitis K., Chondros T., Chryssolouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 38, iss. 1–2. – P. 48–58. – doi: 10.1007/s00170-007-1078-9.
13. Бушуев В.В. Направления конструирования станков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2008. – № 1. – С. 8–13.
14. Станочное оборудование, основанное на комплексировании нескольких технологических операций / В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д. Ю. Корнев, В.Ю. Скиба // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 245–255.
15. 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.
16. Яцерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.
17. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
18. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 351–354. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17.
19. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface / P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, S.I. Petrushin // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 124–130. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.124.
20. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composites // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31, iss. 3. – P. 236–239. – doi: 10.3103/S1068798X11030166.

21. *Skeeba V., Ivancivsky V., Pushnin V.* Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 288–293. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288.

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

23. *ASM Handbook*. Vol. 9. Metallography and microstructures / prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; vol. ed. G.F. Vander Voort. – [Ohio], USA: Materials Park: ASM International, 2004. – 1184 p. – ISBN: 978-0-87170-706-2.

24. *Totten G.E., Howes M., Inoue T.* Handbook of residual stress and deformation of steel. – Ohio: ASM International: Materials Park, 2002. – 499 p. – ISBN 0-87170-729-2.

25. *Springer handbook of experimental solid mechanics* / W.N. Sharpe, ed. – Leipzig: Springer Science; New York: Business Media, 2008. – 1098 p. – ISBN 978-0-387-26883-5. – eISBN 978-0-387-30877-7.

26. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П.* Назначение режимов поверхностной закалки с использованием концентрированных источников нагрева // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2005. – № 3 (28). – С. 22–24.

27. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П.* Методика назначения рациональных режимов поверхностной закалки сталей с использованием концентрированных источников нагрева // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2006. – № 4 (33). – С. 17–19.

28. *Торбило В.М.* Алмазное выравнивание. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.

29. *Швецов А.Н., Скуратов Д.Л.* Исследование влияния параметров процесса алмазного выравнивания на шероховатость поверхности заготовки из стали 15Х12Н2МВФАБ-Ш при использовании индентора из натурального алмаза // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2014. – № 5 (47), ч. 1. – С. 62–67.

30. Formation of the surface layer in diamond smoothing / S.R. Abul'khanov, D.S. Goryainov, D.L. Skuratov, A.N. Shvetsov // *Russian Engineering Research*. – 2015. – Vol. 35, iss. 2. – P. 147–149. – doi: 10.3103/S1068798X15020033.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 31–41

Technological features of forming the quality characteristics of the surface layer during diamond smoothing in the integrated processing

Skeeba V.Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Pushnin V.N., Ph.D. student, e-mail: valerka_777-90@mail.ru

Kornev D.Yu., MSc (Engineering), e-mail: cornev.dima@yandex.ru

Parts K.A., BSc (Engineering), e-mail: krispars@yandex.ru

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

Abstract

Purpose: The required operating features of machine parts are mainly formed at the final stage of its production process. In this regard, the objective is to investigate the features ensuring the quality characteristics of the surface layer of products, achieved at the last step of the integrated processing - diamond smoothing. **Methods:** The experiments were performed on a lathe equipped with an additional source of energy, in the function of which the external quenching circuit providing high-energy high-frequency heating was used. Structural studies were carried out with appliance of optical and scanning electron microscopy. Stress-strain state of the surface layer part was evaluated by X-ray and mechanical methods for the determination of residual stresses. The surface roughness assessment was implemented on the profilograph-profilometers Form Talysurf Series 2 and Zygo New View 7300. **Results and Discussion:** It is found that the diamond smoothing of samples of steel 45 under the proposed principle of integration, which allows processing of parts from one technological base, makes it possible to increase the surface microhardness and residual stress level of compression achieved during the transition surface hardening by high frequency.

The formation in the surface-hardened sample a hardened (cold-worked) layer having a thickness of 0,01...0,02 mm after diamond burnishing is experimentally confirmed. Its microhardness is ~ 868 HV, while the level of compressive stress in the surface layer increases to values $\sigma_{\tau} = -678 \pm 20$ MPa. The rational range of the smoothing power $P_y \in [100; 150]$ N, which guarantees a minimum value of roughness $Ra = 0.18 \pm 0.08$ μm , is determined. The functional dependence of the parameter Ra on processing modes which can be used during the diamond smoothing, based on the high performance and the desired surface roughness is obtained.

Keywords:

complexation, diamond smoothing, treatment modes, roughness, hardness, residual stresses.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-31-41

References

1. Makarov V.M. Kompleksirovannye tekhnologicheskie sistemy: perspektivy i problemy vnedreniya [Well integrated technological systems: prospects and problems of implementation]. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya – RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2011, no. 6 (64), pp. 20–23.
2. 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
3. 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
4. Nagae A. Development trend of multi-tasking machines. *Proceedings of the 11th International Conference on Machine Tool Engineers*, Tokyo, Japan, November 3–5, 2004, pp. 312–323.
5. 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
6. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., McIntosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, iss. 2, pp. 561–583. doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.003
7. Brecher C., Hoffmann F., Karlberger A., Rosen C.-J. Multi-technology platform for hybrid metal processing. The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems "Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier". Tokyo, 2008, pp. 425–428. doi: 10.1007/978-1-84800-267-8_87
8. 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
9. Skeebe V.Yu. Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei mashin pri integratsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the technological processing machinery parts with the integration of abrasive grinding and surface hardening currents by high frequency currents. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2008. 257 p.
10. Ivantsivskii V.V., Skiba V.Yu., Zub N.P., Turevich S.V. [Methods of using processing regimes when integrating abrasive grinding and surface hardening HFC]. *Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennye problemy v tekhnologii mashinostroeniia", posvyashchennoi 100-letiiu so dnia rozhdeniia professora Mukhanova I.I.* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Problems in Mechanical Engineering Technology", dedicated to the 100th anniversary of the birth of professor Mukhanov I.I.]. Novosibirsk, 2009, pp. 84–93. (In Russian)
11. Ivantsivskii V.V., Skiba V.Yu. Effektivnost' ob"edineniya operatsii poverkhnostnoi zakalki i shlifovaniya na odnom tekhnologicheskome oborudovanii [Integration effectiveness of operations of surface hardening and grinding on a single technology equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 4 (49), pp. 15–21.
12. Salonitis K., Chondros T., Chrysosouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 38, iss. 1–2, pp. 48–58. doi: 10.1007/s00170-007-1078-9
13. Bushuev V.V. Napravleniya konstruirovaniya stankov [Destinations design engineering of metalcutters]. *Vestnik MGTU "Stankin" – Bulletin of MSTU "Stankin"*, 2008, no. 1, pp. 8–13.
14. Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu., Skiba V.Yu. Stanochnoe oborudovanie, osnovannoe na kompleksirovanii neskol'kikh tekhnologicheskikh operatsii [Machine-tool equipment, based on a complexation of several working operations]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2014, no. 1, pp. 245–255.

15. Ptitsyn S.V., Skiba V.Yu., Chesov Yu.S., Merezko 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.
16. Yashcheritsyn P.I., Ryzhov E.V., Averchenkov V.I. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroenii* [Technological heredity in mechanical engineering]. Minsk, "Nauka i tekhnika" Publ., 1977. 256 p.
17. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodka Yu.D. *Poverkhnostnyi sloi i ekspluatatsionnye svoystva detalei mashin* [The surface layer and the performance of the machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 240 p.
18. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 351–354. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.17
19. Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Petrushin S.I. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 124–130. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.124
20. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composites. *Russian engineering research*, 2011, vol. 31, iss. 3, pp. 236–239. doi: 10.3103/S1068798X11030166. Translated from *Vestnik Mashinostroeniya*, 2011, no. 3, pp. 50–53.
21. Skeebe V., Ivancivsky V., Pushnin V. Numerical modeling of steel surface hardening in the process of high energy heating by high frequency currents. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 288–293. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.288
22. Skiba 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.
23. Vander Voort G.F., ed. *ASM Handbook*. Vol. 9: *Metallography and microstructures*. Ohio, USA, ASM International Publ., 2004. 1184 p. ISBN 978-0-87170-706-2
24. Totten G.E., Howes M., Inoue T. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Ohio, USA, Materials Park, ASM International Publ., 2002. 499 p. ISBN 0-87170-729-2
25. Sharpe W.N. *Springer handbook of experimental solid mechanics*. Leipzig, Springer Science, New York, Business Media, 2008. 1098 p. ISBN 978-0-387-26883-5. eISBN 978-0-387-30877-7.
26. Ivantsivskii V.V., Skeebe V.Yu., Stepanova N.P. Naznachenie rezhimov poverkhnostnoi zakalki s ispol'zovaniem kontsentrirrovannykh istochnikov nagreva [Assignment mode of surface hardening, which is carried out by using a concentrated heat source]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2005, no. 3 (28), pp. 22–24.
27. Ivantsivskii V.V., Skeebe V.Yu., Stepanova N.P. Metodika naznacheniya ratsional'nykh rezhimov poverkhnostnoi zakalki stali s ispol'zovaniem kontsentrirrovannykh istochnikov nagreva [Rational modes of surface hardening of steels using concentrated heat sources]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2006, no. 4 (33), pp. 17–19.
28. Torbilo V.M. *Almaznoe vyglazhivanie* [Diamond smoothing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 105 p.
29. Shvetsov A.N., Skuratov D.L. Issledovanie vliyaniya parametrov protsessa almaznogo vyglazhivaniya na sherokhovatost' poverkhnosti zagotovki iz stali 15Kh12N2MVFAB-Sh pri ispol'zovanii indentora iz natural'nogo almaza [Research of the influence of the diamond burnishing process parameters on the surface roughness of a steel 15Cr12Ni2MoVWNB-S workpiece when using an indenter made of natural diamond]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2014, no. 5 (47), pt. 1, pp. 62–67.
30. Abul'khanov S.R., Goryainov D.S., Skuratov D.L., Shvetsov A.N. Formation of the surface layer in diamond smoothing. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, iss. 2, pp. 147–149. doi: 10.3103/S1068798X15020033. Translated from *STIN*, 2014, no. 8, pp. 28–31.

Funding

The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 13-08-01102 a.

Article history:

Received 1 June 2015

Revised 2 July 2015

Accepted 27 July 2015