

Научная статья

УДК 621.9.011

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177623>

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Алексей Николаевич Швецов<sup>1</sup> ✉, Дмитрий Леонидович Скуратов<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
(Самарский университет),

Самара, Россия

<sup>1</sup> [shvecovalexey@yandex.ru](mailto:shvecovalexey@yandex.ru) ✉

<sup>2</sup> [skuratov-sdl56@yandex.ru](mailto:skuratov-sdl56@yandex.ru)

**Аннотация.** На основе однофакторных и полнофакторных экспериментов при выполнении процесса алмазного выглаживания образцов из жаропрочной деформируемой стали 15Х12Н2МВФАБ-Ш (ЭП517-Ш) и высокопрочной стали 30ХГСН2А-ВД исследовано влияние силы выглаживания, радиуса сферы алмазного наконечника, исходной шероховатости, подачи инструмента и скорости обработки на шероховатость поверхности образцов, микротвердость поверхностного слоя, а также окружные и осевые остаточные напряжения. Получены эмпирические степенные зависимости, связывающие указанные параметры процесса алмазного выглаживания с параметрами, определяющими качество поверхностного слоя, а именно: шероховатостью поверхности, максимальной микротвердостью и глубиной деформационного упрочнения, максимальными окружными сжимающими остаточными напряжениями и глубиной залегания их максимума и максимальными осевыми сжимающими остаточными напряжениями. Установлены параметры процесса алмазного выглаживания, оказывающие определяющее влияние на формирование шероховатости поверхности, остаточных напряжений, а также на микротвердость поверхностного слоя.

**Ключевые слова:** выглаживание алмазным инструментом со сферической рабочей частью, элементы процесса выглаживания, шероховатость поверхности, микротвердость поверхностного слоя, сжимающие остаточные напряжения

**Для цитирования:** Швецов А.Н., Скуратов Д.Л. Влияние параметров процесса алмазного выглаживания на качество поверхностного слоя деталей при производстве изделий авиационной техники // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 220–231. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177623>

Original article

## DIAMOND BURNISHING PROCESS PARAMETERS IMPACT ON THE SURFACE LAYER QUALITY OF THE PARTS WHILE AVIATION TECHNOLOGY PRODUCTS MANUFACTURING

Aleksei N. Shvetsov<sup>1</sup> ✉, Dmitrii L. Skuratov<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (Samara University),  
Samara, Russia

<sup>1</sup> [shvecovalexey@yandex.ru](mailto:shvecovalexey@yandex.ru) ✉

<sup>2</sup> [skuratov-sdl56@yandex.ru](mailto:skuratov-sdl56@yandex.ru)

© Швецов А.Н., Скуратов Д.Л., 2023

### Abstract

The effect of burnishing force, radius of diamond point sphere, initial roughness, tool advance and machining speed on the samples surface roughness, micro-hardness of surface layer, as well as circular and axial residual stresses was studied based on single-factor and full-factor experiments while performing diamond burnishing of the samples from the 15Cr12Ni2MoVWNNb-S (EP517-S) heat resistant wrought steel and 30CrMnSiNi2A high-resistance steel. Empirical power dependences were obtained linking the above said parameters of the diamond burnishing process with those defining the surface layer quality, namely with the surface roughness, maximum micro-hardness and strain hardening, maximum value of the circular residual compressive stresses and their maximum depth of occurrence, as well as maximum value of the axial compressive stresses.

The studies revealed that the main effect on the surface roughness at the burnishing force from 50 to 200 N was exerted by the tool sphere radius and tool advance, while at the force from 200 to 350 N these were the burnishing force and the tip sphere radius. In the case of the samples burnishing with natural diamond, the determining effect at the burnishing force from 50 to 350 N is the burnishing force and initial surface roughness. When machining the 30XGSN2A steel by the ASB-1 synthetic diamond, the same parameters as for the EP517-S steel burnishing have the greatest impact on the surface roughness. Radius of the diamond burnisher (ASB-1) and machining speed have the greatest impact on the micro-hardness value of the surface layer of the samples from both EP517-S and 30XGSN2A steel. At the same time, the burnishing force and diamond tip sphere radius have decisive impact while machining the samples from the EP517-S steel, and burnishing force and tool advance are the main factors while the samples from the 30XGSN2A steel machining. The tool sphere radius and advance have the greatest effect on the circular residual stresses forming by the tool with the ASB-1 diamond while the samples from the EP517-S steel burnishing, while both the tool sphere radius and burnishing force prevail while the 30XGSN2A steel burnishing. The most notable parameters affecting axial residual stresses while processing samples from the EP517-S steel are the sphere radius and the burnisher tracking force, and at the samples from the 30XGSN2A steel machining these are the tip sphere radius and the burnisher advance.

Samples made of 30CrMnSiNi2A steel processing by the ASB-1 synthetic diamond had the same dependences temper as for the samples made of EP517-SH steel.

At the same time, during the processing of samples made of EP517-S steel the definite influence on strain hardening depth had burnishing force and radius of diamond point, but for samples made of 30CrMnSiNi2A steel - burnishing force and tool feed.

Generation of hoop locked-up stresses during the burnishing of samples made of EP517-S steel by tool with diamond ASB-1 was affected by the radius of diamond point and feed, on the other hand during the burnishing of samples made of 30CrMnSiNi2A steel there was another combination of significant factors: burnishing force and radius of diamond point.

**Keywords:** burnishing with a diamond tool with a spherical working part, burnishing process elements, surface roughness, surface layer microhardness, compressive residual stresses

**For citation:** Shvetcov A.N., Skuratov D.L. Diamond Burnishing Process Parameters Impact on the Surface Layer Quality of the Parts while Aviation Technology Products Manufacturing. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 220–231. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177623>

---

---

### Введение

Поверхностное пластическое деформирование является неотъемлемой частью многих технологических процессов изготовления высоконагруженных и ответственных деталей различных изделий, в том числе летательных аппаратов [1] и их двигателей [2]. К методам поверхностного пластического деформирования относится и алмазное выглаживание — один из эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностного слоя деталей. Эффективность его обусловлена достаточно высокой производительностью и размерной стойкостью выглаживающего инструмента [3, 4], а также возможностью повышения качества обработки за счет

снижения шероховатости поверхности, увеличения микротвердости поверхностного слоя и формирования в нем сжимающих остаточных напряжений [5–8], что способствует повышению износостойкости и предела выносливости деталей [8, 9], т. е. надежности и уровня качества образцов авиационной техники [10]. Данный метод используется для обработки наружных и внутренних цилиндрических, конических, фасонных, а также плоских поверхностей высоконагруженных деталей, испытывающих значительные знакопеременные нагрузки. Для алмазного выглаживания не требуется специальное металлорежущее оборудование, поэтому оно может выполняться как на универсальных станках, так и

на станках, оснащенных системами числового программного управления (ЧПУ).

Как известно, алмазное выглаживание обеспечивает либо сглаживание, либо упрочнение поверхности. Поэтому данный процесс применяется как на отделочных, так и на упрочняющих операциях. После выполнения операций алмазного выглаживания в зависимости от марки и состояния обрабатываемого материала отклонения формы остаются неизменными либо в небольшой мере снижаются, а изменение геометрических размеров, как правило, не превышает высоты микро-неровностей. Степень упрочнения поверхностного слоя деталей, как правило, находится в пределах от 10 до 60 % при глубине слоя 0,1 ... 0,3 мм [2, 5, 6, 11], а окружные и осевые сжимающие остаточные напряжения (ОН) могут составлять соответственно  $\sigma_{т. max} = -(300 \dots 1200)$  МПа и  $\sigma_{о. max} = -(700 \dots 1800)$  МПа [5, 7, 8, 9, 11, 12]. При этом структура материала, находящегося в зоне выглаживания, улучшается за счет обеспечения ее однородности, а шероховатость поверхности по параметру  $Ra$  может быть снижена до значений 1,25 ... 0,04 мкм [2, 9, 11, 12].

Качество поверхностного слоя деталей, как показала практика, в значительной мере зависит от технологических элементов процесса алмазного выглаживания, а именно: величины подачи выглаживателя, усилия прижима инструмента, радиуса сферы рабочей части инструмента, скорости обработки, исходной шероховатости выглаживаемой поверхности и т. д. Поэтому для удовлетворения технических требований, предъявляемых к состоянию поверхностного слоя деталей, обработку следует вести на рациональных режимах, определяемых на основе использования различных аналитических моделей, в которых в качестве технических ограничений используются математические зависимости, связывающие параметры, характеризующие каче-

ство обработки с элементами процесса алмазного выглаживания. Получению таких зависимостей посвящены работы многих отечественных и зарубежных авторов [5–7, 9, 12–20]. К сожалению, в настоящее время такие зависимости существуют лишь для ограниченного перечня материалов и в большинстве случаев для конструкционных углеродистых и низколегированных сталей. Подробный анализ процесса алмазного выглаживания приведен в работе [21].

При производстве валов газотурбинных двигателей (рис.1), изготавливаемых из жаропрочной деформируемой стали 15X12H2МВФАБ-Ш, а также стоек и цилиндров взлетно-посадочных устройств (шасси) самолетов (рис. 2), выполняемых из высокопрочной стали 30ХГСН2А, технологическими процессами их изготовления предусмотрены операции алмазного выглаживания. Для определения рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания деталей из сталей 15X12H2МВФАБ-Ш и 30ХГСН2А посредством использования, например, линейных математических моделей необходимо иметь экспериментальные степенные зависимости, связывающие параметры качества обработки, такие как шероховатость поверхности, микротвердость поверхностного слоя и остаточные напряжения, с технологическими элементами процесса алмазного выглаживания, которые могут быть использованы в качестве технических ограничений в ранее упомянутых моделях [21]. Поэтому целью данной работы является получение этих зависимостей и применение их для определения рациональных условий выглаживания деталей из указанных материалов, что позволит обеспечить заданные конструктором требования к состоянию поверхностного слоя.

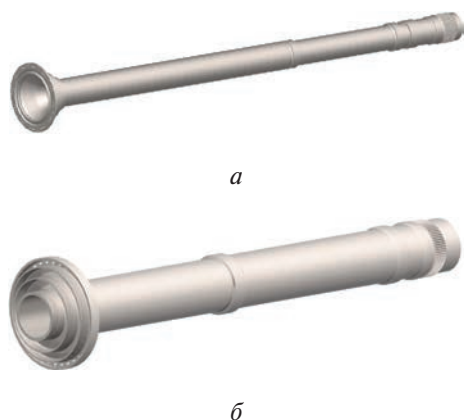


Рис. 1. Валы турбин газотурбинных двигателей из стали 15X12H2МВФАБ-Ш:  
а – низкого давления; б – среднего давления

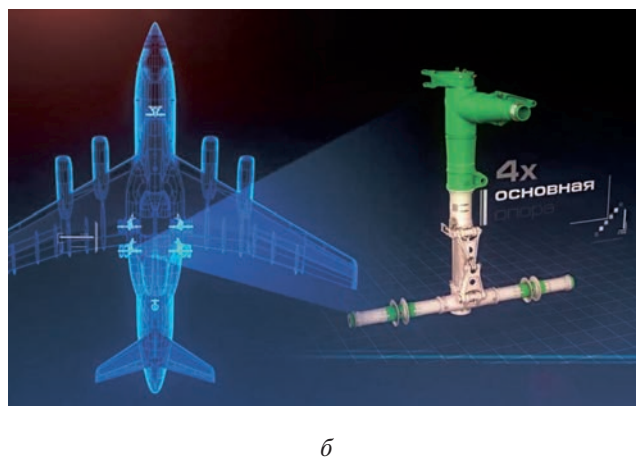


Рис. 2. Основная стойка шасси военно-транспортного самолета Ил-476 [21]

### Оборудование, образцы, инструмент, средства измерения и методика проведения экспериментальных исследований

Для получения степенных зависимостей, связывающих шероховатость поверхности, микротвердость поверхностного слоя и глубину деформационного упрочнения, сжимающие окружные и осевые остаточные напряжения, а также глубину залегания максимума окружных остаточных напряжений с элементами процесса алмазного выглаживания, был проведен комплекс экспериментальных исследований.

Оборудованием при проведении экспериментальных исследований служили токарно-винторезные станки моделей 1А616П и 1В616А. Предварительная токарная обработка образцов-колец осуществлялась на токарно-винторезном станке модели 1А616П, а окончательная токарная обработка и последующий процесс выглаживания выполнялись на токарно-винторезном станке модели 1В616А, для чего была спроектирована и изготовлена специальная оправка. Инструментом служили выглаживатели с алмазными наконечниками, выполненными из натуральных алмазов (ОСТ2 И77 575) и из синтетических алмазов марки АСБ-1. Марка алмазов выбиралась на основе рекомендаций, изложенных в работах [8, 23]. Исследование влияния технологических элементов процесса алмазного выглаживания на шероховатость поверхности осуществлялось на полых цилиндрических образцах из сталей 15Х12Н2МВФАБ-Ш и 30ХГСН2А, вырезанных соответственно из вала турбины низкого давления ГТД и основной стойки шасси самолета и разделенных на участки путем прорезки канавок шириной и глубиной примерно 1,5 ... 2 мм. Исследование же влияния этих элементов на микротвердость поверхностного слоя, а также величину и характер распределения окружных и осевых сжимающих ОН осуществлялось на образцах, представляющих собой часть круговых колец, и образцах-полосках, вырезанных из указанных деталей.

Экспериментальные исследования влияния параметров процесса алмазного выглаживания на шероховатость поверхности ( $Ra$ ), а именно: силы прижима индентора (силы выглаживания)  $P_{у\text{ выг}}$ , радиуса сферы алмаза (выглаживателя)  $R_{сф.выг}$ , исходной шероховатости поверхности образцов  $R_{исх.пов}$ , скорости движения продольной подачи выглаживателя  $S_{о.выг}$  и скорости обработки (главного движения)  $v_{выг}$  — были выполнены на основе однофакторных натуральных экспериментов. Исследования же влияния  $P_{у\text{ выг}}$ ,  $R_{сф.выг}$ ,  $S_{о.выг}$  и  $v_{выг}$  на микротвердость поверхностного слоя  $H_{ц}$  и глубину деформационного упрочнения  $\Delta h$ , окружные  $\sigma_{\tau}$  и осевые  $\sigma_o$  ОН, а также на глубину залегания максимума ОН напряжений  $a$  у образцов из ука-

занных ранее материалов были выполнены посредством полных факторных натуральных экспериментов (ПФЭ) с матрицей планирования  $2^4$ .

Для измерения шероховатости поверхности образцов применялся профилограф-профилометр модели БВ-7669. Измерение микротвердости по глубине поверхностного слоя у исследуемых образцов осуществлялось путем использования метода косых срезов с помощью микротвердомера ПМТ-3 по методике, изложенной в ГОСТ 9450-76 (Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников). Исследование величины и характера распределения остаточных напряжений осуществлялось при помощи автоматизированной установки АСБ-1, путем послойного удаления материала с заданной поверхности образцов посредством электрохимического травления. Общий вид установки представлен на рис. 3, а схемы закрепления образцов при травлении показаны на рис. 4.

Для обеспечения постоянства температуры электролита, состоящего из 80% ортофосфорной кислоты, 14% серной кислоты и 6% хромового ангидрида, и, следовательно, равномерности скорости травления плотность тока не превышала 15 ... 25 А/дм<sup>2</sup>.

### Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Результаты однофакторных экспериментов по исследованию влияния параметров процесса алмазного выглаживания на шероховатость поверхности представлены на рис. 5 и 6.

Увеличение радиуса рабочей сферы выглаживателя и исходной шероховатости поверхности образцов приводит соответственно к снижению (рис. 5,б и 6,б) и росту (рис. 5,в и 6,в) параметра  $Ra$  при обработке как натуральными, так и синтетическими алмазами.

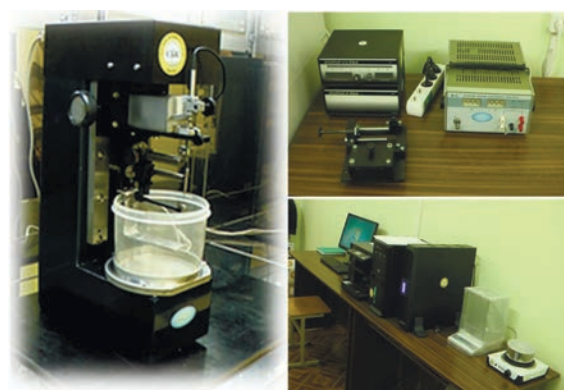


Рис. 3. Установка для определения остаточных напряжений АСБ-1

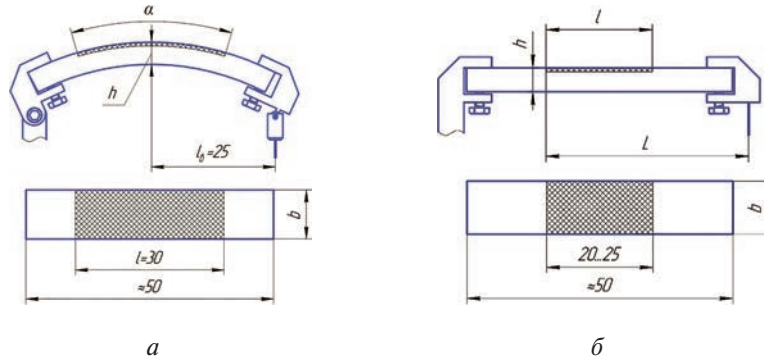


Рис. 4. Схемы закрепления части кругового кольца (а) и образца-полоски (б) в оправке установки АСБ-1

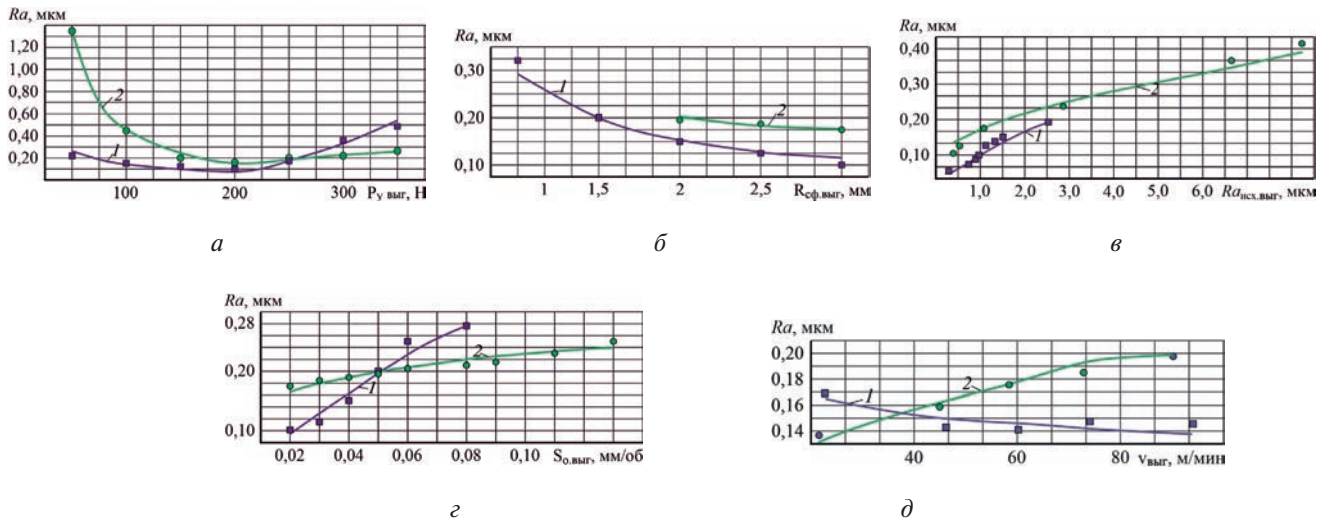


Рис. 5. Влияние силы выглаживания (а), радиуса сферы алмаза (б), исходной шероховатости (в), величины подачи (г) и скорости обработки (д) на величину шероховатости поверхности при обработке образцов из стали 15Х12Н2МВФАБ-Ш: ■ – экспериментальные данные для синтетических (1) алмазов; ● – экспериментальные данные для натуральных (2) алмазов

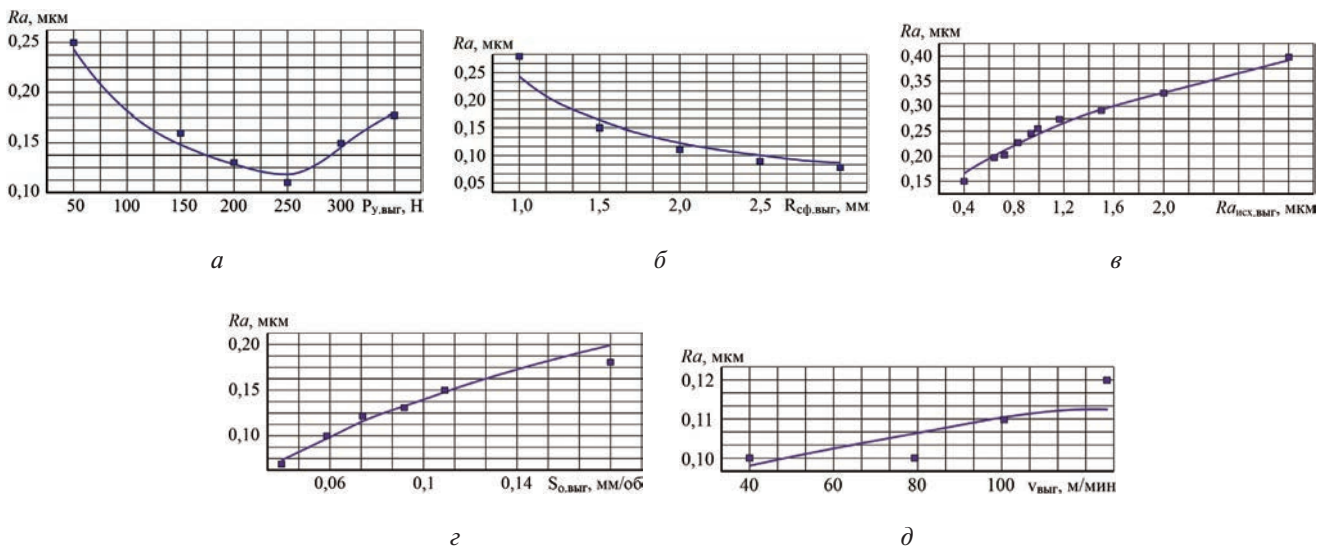


Рис. 6. Влияние силы выглаживания (а), радиуса сферы алмаза (б), исходной шероховатости (в), величины подачи (г) и скорости обработки (д) на величину шероховатости поверхности при обработке образцов из стали 30ХГСН2А инденторами с наконечниками из синтетического алмаза АСБ-1

Из экспериментальных зависимостей, связывающих шероховатость поверхности  $Ra$  с подачей алмазного выглаживателя  $S_0$  при обработке образцов из сталей 15X12H2МВФАБ-Ш (рис. 5,з) и 30ХГСН2А (рис. 6,з), следует, что с увеличением подачи шероховатость поверхности возрастает, причем более интенсивно при обработке синтетическим алмазом АСБ-1 и менее интенсивно при обработке натуральным алмазом.

С ростом скорости обработки при выглаживании образцов из стали 15X12H2МВФАБ-Ш синтетическим алмазом АСБ-1 шероховатость незначительно уменьшается (5,д), а при выглаживании образцов из стали 30ХГСН2А индентором с наконечником из синтетического алмаза незначительно возрастает (рис. 6,д), что, по-видимому, связано с большей пластичностью стали 15X12H2МВФАБ-Ш по сравнению со сталью 30ХГСН2А. В то же время при выглаживании образцов из стали 15X12H2МВФАБ-Ш натуральным алмазом с увеличением скорости обработки шероховатость поверхности возрастает (см. рис. 5,д), а не уменьшается, как в случае использования алмаза АСБ-1. На наш взгляд, это может быть связано с несколько худшими физико-механическими характеристиками натурального алмаза.

По результатам комплекса однофакторных экспериментов получены общие степенные зависимости, устанавливающие влияние технологических элементов процесса алмазного выглаживания на параметр шероховатости  $Ra$ :

– для образцов из стали 15X12H2МВФАБ-Ш: при выглаживании синтетическими алмазами: при силе выглаживания от 50 до 200 Н

$$Ra = 50 \cdot S_{o.выг}^{0,8} \cdot P_{y.выг}^{-0,52} \cdot Ra_{исх.пов}^{0,65} \cdot R_{сф.выг}^{-1,05} \cdot v_{выг}^{-0,11},$$

при силе выглаживания свыше 200 до 350 Н

$$Ra = 99 \cdot 10^{-8} \cdot S_{o.выг}^{0,8} \cdot P_{y.выг}^{2,82} \cdot Ra_{исх.пов}^{0,65} \cdot R_{сф.выг}^{-1,05} \cdot v_{выг}^{-0,11},$$

при выглаживании натуральными алмазами: при силе выглаживания от 50 до 200 Н

$$Ra = 200 \cdot S_{o.выг}^{0,17} \cdot P_{y.выг}^{-1,54} \cdot Ra_{исх.пов}^{0,44} \cdot R_{сф.выг}^{-0,31} \cdot v_{выг}^{-0,26},$$

при силе выглаживания свыше 200 до 350 Н

$$Ra = 144,6 \cdot 10^{-5} \cdot S_{o.выг}^{0,17} \cdot P_{y.выг}^{0,71} \cdot Ra_{исх.пов}^{0,44} \cdot R_{сф.выг}^{-0,31} \cdot v_{выг}^{-0,26},$$

– для образцов из стали 30ХГСН2А:

при силе выглаживания от 50 до 200 Н

$$Ra = 9,84 \cdot S_{o.выг}^{0,6} \cdot P_{y.выг}^{-0,49} \cdot R_{сф.выг}^{-1,15} \cdot Ra_{исх.пов}^{0,46} \cdot v_{выг}^{0,14},$$

при силе выглаживания свыше 200 до 350 Н

$$Ra = 18,6 \cdot 10^{-5} \cdot S_{o.выг}^{0,6} \cdot P_{y.выг}^{1,47} \cdot R_{сф.выг}^{-1,15} \cdot Ra_{исх.пов}^{0,46} \cdot v_{выг}^{0,14}.$$

Экспериментальные данные о влиянии силы выглаживания, радиуса сферы алмазного наконечника, скорости движения продольной подачи инструмента и скорости обработки на микротвердость поверхностного слоя образцов из сталей 15X12H2МВФАБ-Ш и 30ХГСН2А, полученные посредством ПФЭ, представлены соответственно на рис. 7 и 8. Выглаживание образцов осуществлялось инструментами с наконечниками из синтетического алмаза АСБ-1. На основе обработки имеющихся данных получены эмпирические зависимости (модели), связывающие наибольшее значение микротвердости поверхностного слоя и глубину пластической деформации материала с указанными ранее технологическими элементами процесса алмазного выглаживания:

– для образцов из стали 15X12H2МВФАБ-Ш:

$$H_{\mu} = 4800 \cdot S_{o.выг}^{-0,064} \cdot P_{y.выг}^{0,072} \cdot R_{сф.выг}^{-0,162} \cdot v_{выг}^{-0,074};$$

$$\Delta h = 10 \cdot S_{o.выг}^{-0,099} \cdot P_{y.выг}^{0,569} \cdot R_{сф.выг}^{-0,124} \cdot v_{выг}^{-0,106};$$

– для образцов 30ХГСН2А:

$$H_{\mu} = 7100 \cdot S_{o.выг}^{-0,037} \cdot P_{y.выг}^{0,017} \cdot R_{сф.выг}^{-0,28} \cdot v_{выг}^{-0,059};$$

$$\Delta h = 5 \cdot S_{o.выг}^{-0,279} \cdot P_{y.выг}^{0,358} \cdot R_{сф.выг}^{-0,25} \cdot v_{выг}^{-0,076}.$$

Адекватность представленных моделей была проверена с использованием  $F$ -критерия Фишера.

Исследования показали, что наибольшее влияние на микротвердость поверхностного слоя образцов из сталей 15X12H2МВФАБ-Ш и 30ХГСН2А оказывают радиус сферы выглаживателя и скорость обработки. В то же время на глубину деформационного упрочнения материала при обработке образцов из стали 15X12H2МВФАБ-Ш определяющее влияние оказывают сила выглаживания и радиус сферы инструмента, а при обработке образцов из стали 30ХГСН2А – сила выглаживания и подача.

Результаты исследования влияния параметров процесса алмазного выглаживания на величину и характер распределения остаточных напряжений при обработке стали 15X12H2МВФАБ-Ш приведены на рис. 9 и 10, а при обработке стали 30ХГСН2А – на рис. 11 и 12. В процессе исследования было установлено влияние силы выглаживания, радиуса сферы алмазного наконечника, подачи инструмента и скорости обработки на максимальную величину окружных и осевых остаточных напряжений, а также влияние данных параметров на глубину залегания максимума окружных остаточных напряжений. Выглаживание образцов, так же как и при исследовании микротвердости, осуществлялось инструментами с наконечниками из синтетического алмаза АСБ-1.

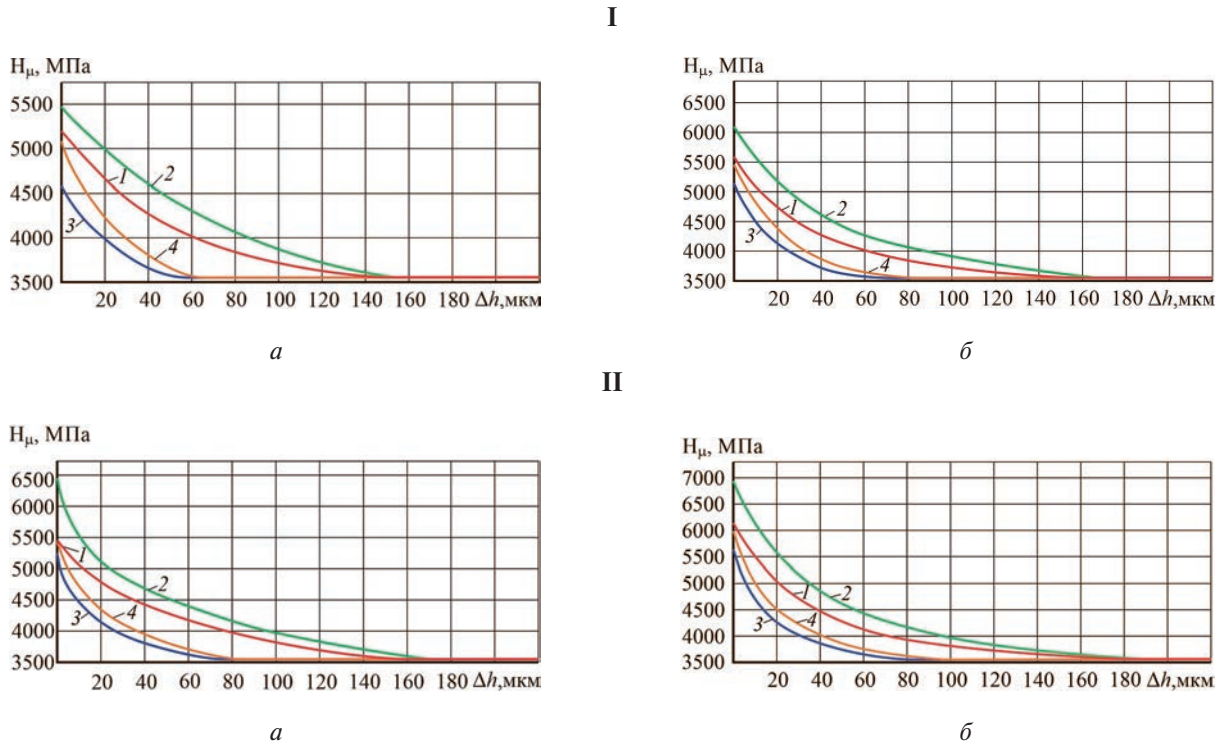


Рис. 7. Изменение микротвердости в поверхностном слое образцов из стали 15X12H2MBΦAB-Ш, выглаженных при значениях движения подачи  $S_{о.выг} = 0,08$  мм/об (а);  $S_{о.выг} = 0,02$  мм/об (б) и скоростях  $v_{выг} = 86$  м/мин (I),  $v_{выг} = 22$  м/мин (II):  
 1 –  $P_{у.выг} = 200$  Н,  $R_{сф.выг} = 2,5$  мм; 2 –  $P_{у.выг} = 200$  Н,  $R_{сф.выг} = 1,5$  мм;  
 3 –  $P_{у.выг} = 50$  Н,  $R_{сф.выг} = 2,5$  мм; 4 –  $P_{у.выг} = 50$  Н,  $R_{сф.выг} = 1,5$  мм

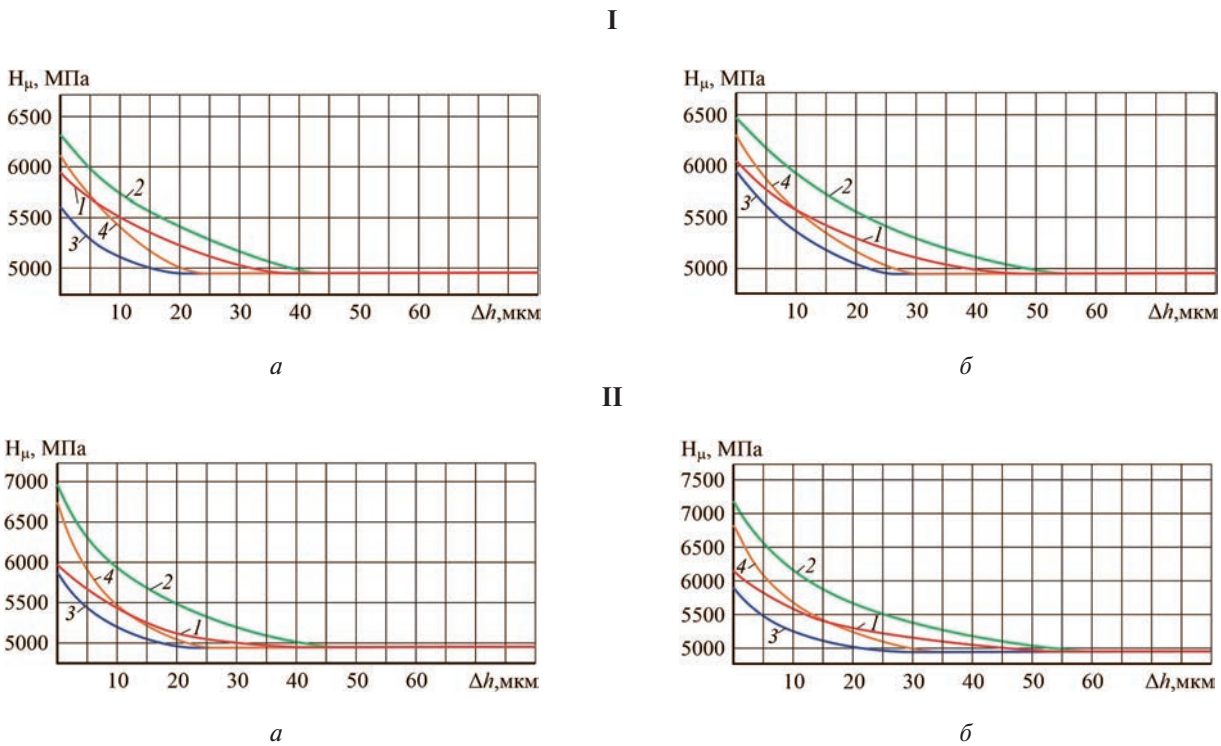


Рис. 8. Изменение микротвердости в поверхностном слое образцов из стали 30XГСН2А, выглаженных при значениях движения подачи  $S_{о.выг} = 0,091$  мм/об (а);  $S_{о.выг} = 0,037$  мм/об (б) и скоростях  $v_{выг} = 126,7$  м/мин (I),  $v_{выг} = 40,1$  м/мин (II):  
 1 –  $P_{у.выг} = 250$  Н,  $R_{сф.выг} = 2,5$  мм; 2 –  $P_{у.выг} = 250$  Н,  $R_{сф.выг} = 1,5$  мм;  
 3 –  $P_{у.выг} = 50$  Н,  $R_{сф.выг} = 2,5$  мм; 4 –  $P_{у.выг} = 50$  Н,  $R_{сф.выг} = 1,5$  мм

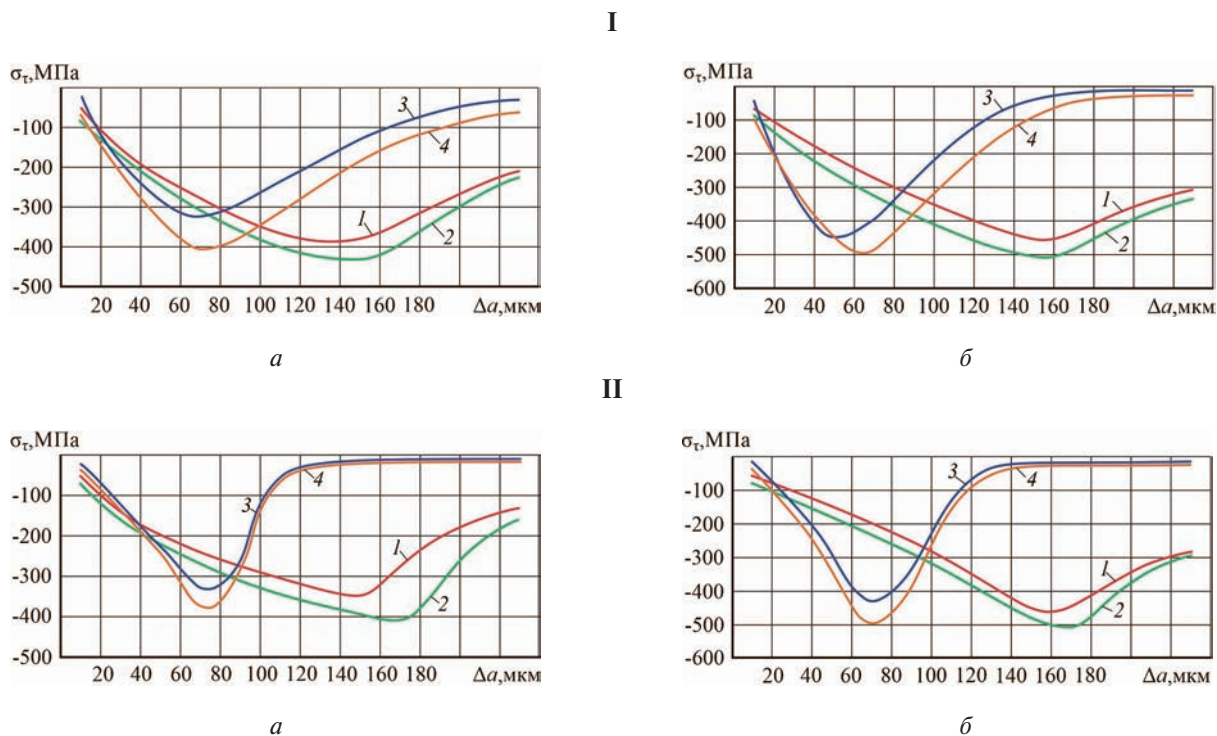


Рис. 9. Окружные ОН в поверхностном слое образцов-колец из стали 15Х12Н2МВФАБ-Ш, выглаженных при значениях движения подачи  $S_{0,выг} = 0,08$  мм/об (а);  $S_{0,выг} = 0,02$  мм/об (б) и скоростях  $v_{выг} = 86$  м/мин (I),  $v_{выг} = 22$  м/мин (II):  
 1 –  $P_{у,выг} = 200$  Н,  $R_{сф,выг} = 2,5$  мм; 2 –  $P_{у,выг} = 200$  Н,  $R_{сф,выг} = 1,5$  мм;  
 3 –  $P_{у,выг} = 50$  Н,  $R_{сф,выг} = 2,5$  мм; 4 –  $P_{у,выг} = 50$  Н,  $R_{сф,выг} = 1,5$  мм

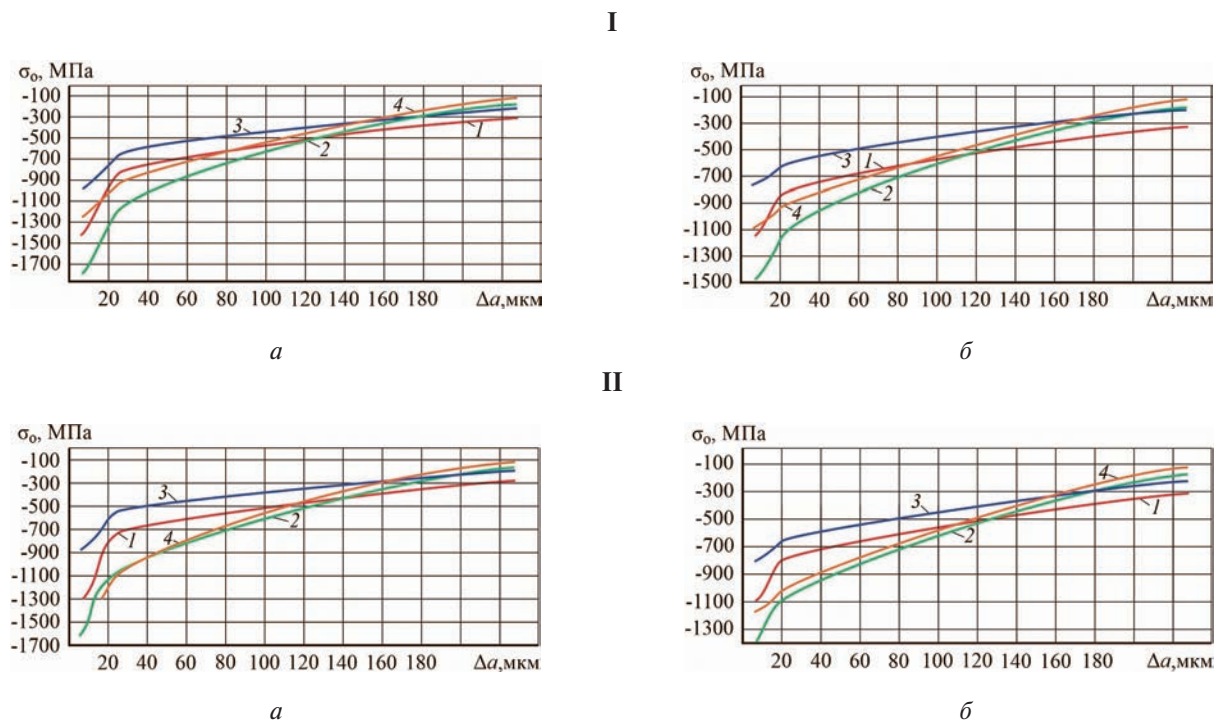


Рис. 10. Осевые ОН в поверхностном слое образцов-колец из стали 15Х12Н2МВФАБ-Ш, выглаженных при значениях движения подачи  $S_{0,выг} = 0,08$  мм/об (а);  $S_{0,выг} = 0,02$  мм/об (б) и скоростях  $v_{выг} = 86$  м/мин (I),  $v_{выг} = 22$  м/мин (II):  
 1 –  $P_{у,выг} = 200$  Н,  $R_{сф,выг} = 2,5$  мм; 2 –  $P_{у,выг} = 200$  Н,  $R_{сф,выг} = 1,5$  мм;  
 3 –  $P_{у,выг} = 50$  Н,  $R_{сф,выг} = 2,5$  мм; 4 –  $P_{у,выг} = 50$  Н,  $R_{сф,выг} = 1,5$  мм



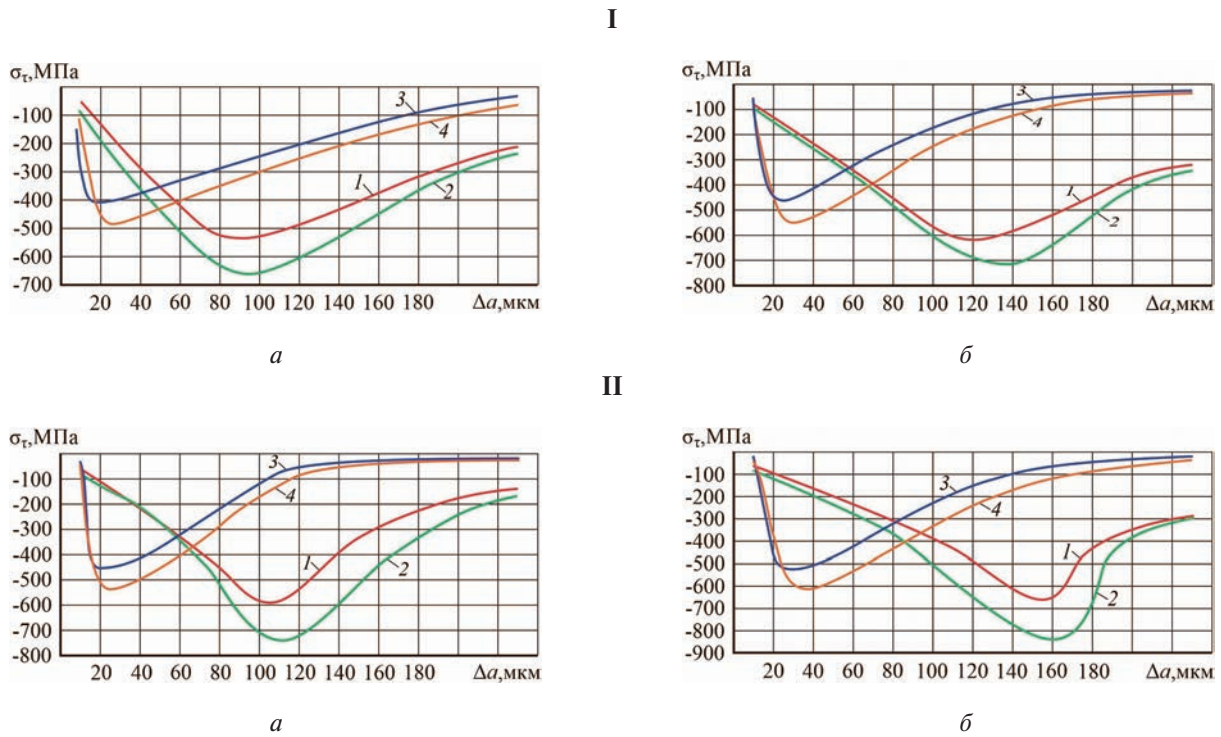


Рис. 11. Окружные ОН в поверхностном слое образцов-колец из стали 30ХГСН2А, выглаженных при значениях движения подачи  $S_{о.выг} = 0,091$  мм/об (а);  $S_{о.выг} = 0,037$  мм/об (б) и скоростях  $v_{выг} = 126,7$  м/мин (I),  $v_{выг} = 40,1$  м/мин (II):  
 1 –  $P_{у.выг} = 250$  Н,  $R_{сф.выг} = 2,5$  мм; 2 –  $P_{у.выг} = 200$  Н,  $R_{сф.выг} = 1,5$  мм;  
 3 –  $P_{у.выг} = 50$  Н,  $R_{сф.выг} = 2,5$  мм; 4 –  $P_{у.выг} = 50$  Н,  $R_{сф.выг} = 1,5$  мм

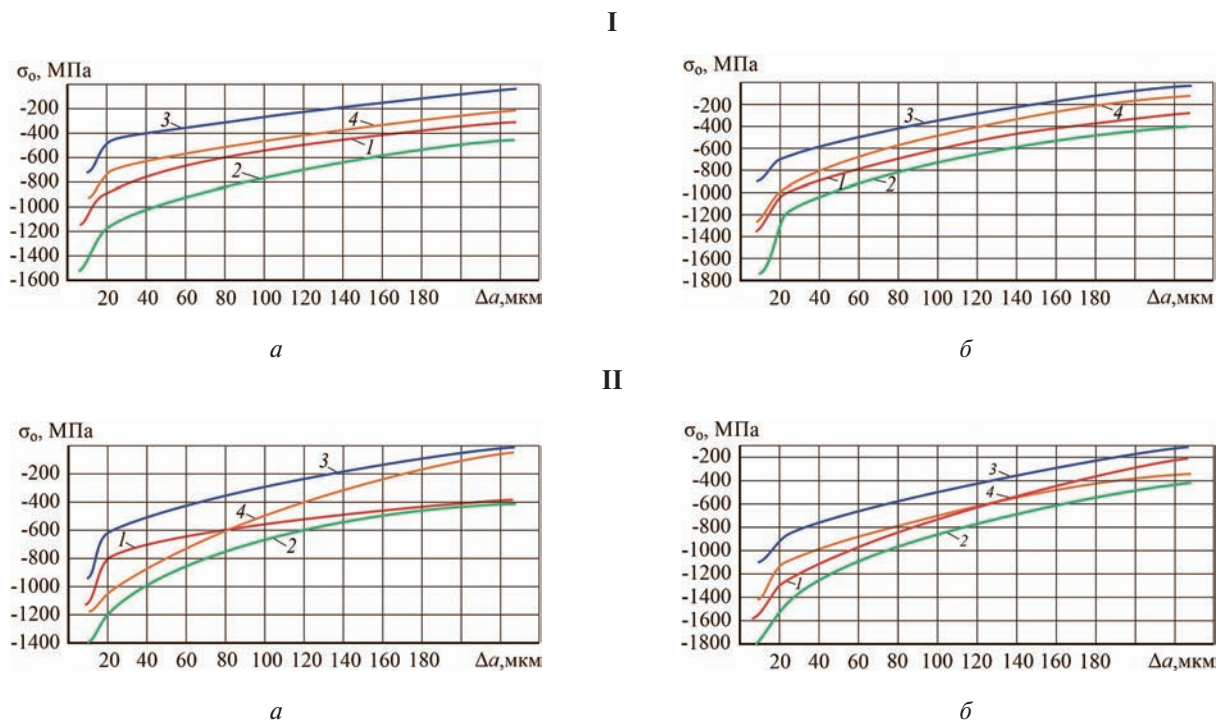


Рис. 12. Осевые ОН в поверхностном слое образцов-колец из стали 30ХГСН2А, выглаженных при значениях движения подачи  $S_{о.выг} = 0,091$  мм/об (а);  $S_{о.выг} = 0,037$  мм/об (б) и скоростях  $v_{выг} = 126,7$  м/мин (I),  $v_{выг} = 40,1$  м/мин (II):  
 1 –  $P_{у.выг} = 250$  Н,  $R_{сф.выг} = 2,5$  мм; 2 –  $P_{у.выг} = 200$  Н,  $R_{сф.выг} = 1,5$  мм;  
 3 –  $P_{у.выг} = 50$  Н,  $R_{сф.выг} = 2,5$  мм; 4 –  $P_{у.выг} = 50$  Н,  $R_{сф.выг} = 1,5$  мм

Степень влияния указанных ранее параметров на остаточные напряжения и глубину залегания максимума окружных остаточных напряжений видна из степенных зависимостей (моделей), полученных после обработки результатов ПФЭ и проверки их на адекватность:

– для образцов из стали 15X12H2МВФАБ-Ш:

$$\sigma_{\tau \max} = 215 \cdot S_{\text{о.выг}}^{-0,175} \cdot P_{\text{у.выг}}^{0,046} \cdot R_{\text{сф.выг}}^{-0,251} \cdot v_{\text{выг}}^{-0,018},$$

$$a = 10 \cdot S_{\text{о.выг}}^{0,016} \cdot P_{\text{у.выг}}^{0,589} \cdot R_{\text{сф.выг}}^{-0,152} \cdot v_{\text{выг}}^{-0,083},$$

$$\sigma_{\text{о max}} = 812 \cdot S_{\text{о.выг}}^{0,112} \cdot P_{\text{у.выг}}^{0,225} \cdot R_{\text{сф.выг}}^{-0,557} \cdot v_{\text{выг}}^{0,024}$$

– для образцов 30ХГСН2А:

$$\sigma_{\tau \max} = 308 \cdot S_{\text{о.выг}}^{-0,145} \cdot P_{\text{у.выг}}^{0,183} \cdot R_{\text{сф.выг}}^{-0,377} \cdot v_{\text{выг}}^{-0,87},$$

$$a = 0,42 \cdot S_{\text{о.выг}}^{-0,4} \cdot P_{\text{у.выг}}^{0,964} \cdot R_{\text{сф.выг}}^{-0,225} \cdot v_{\text{выг}}^{-0,143},$$

$$\sigma_{\text{о max}} = 557 \cdot S_{\text{о.выг}}^{-0,245} \cdot P_{\text{у.выг}}^{0,183} \cdot R_{\text{сф.выг}}^{-0,533} \cdot v_{\text{выг}}^{0,099}.$$

При обработке образцов из стали 15X12H2МВФАБ-Ш доминирующее влияние на максимальное значение окружных ОН оказывают радиус алмазного наконечника и подача, а на глубину залегания максимума этих напряжений – сила выглаживания и радиус сферы индентора. На максимум осевых ОН определяющее влияние оказывают радиус сферы и прижимная сила выглаживателя.

Несколько иная картина наблюдается при выглаживании высокопрочной стали 30ХГСН2А. В этом случае на максимальное значение окружных ОН в наибольшей степени влияют радиус сферы инструмента и сила выглаживания, а на глубину залегания максимума этих напряжений – сила выглаживания и подача инструмента. На максимум осевых ОН доминирующее влияние оказывают радиус сферы инструмента и подача выглаживателя.

## Выводы

1. Впервые получены эмпирические степенные зависимости для жаропрочной деформируемой стали 15X12H2МВФАБ-Ш и высокопрочной стали 30ХГСН2А, связывающие технологические элементы процесса алмазного выглаживания (силу прижима индентора, радиус сферы алмаза, исходную шероховатость, подачу и скорость обработки) с шероховатостью поверхности, микротвердостью поверхностного слоя и остаточными напряжениями и используемые для определения рациональных условий пластического деформирования данных материалов.

2. Установлены параметры, оказывающие доминирующее влияние на формирование шероховатости поверхности, остаточных напряжений, а также микротвердость поверхностного слоя при алмазном

выглаживании материалов, что дает возможность технологю регулировать состояние поверхностного слоя деталей. В целом полученные результаты не противоречат результатам исследований других авторов.

3. Применение представленных в статье степенных зависимостей при оптимизации процессов алмазного выглаживания валов авиационных газотурбинных двигателей семейства «НК», а также стоек и цилиндров шасси военно-транспортных самолетов Ил-476 позволило в 1,5 ... 1,8 раза повысить производительность процессов выглаживания, при стабильном удовлетворении требований к состоянию поверхностного слоя деталей [21].

## Список источников

1. Комков В.А., Кокорева О.Г., Курсаков А.В. Исследование возможностей упрочнения поверхностей тонкостенных элементов летательных аппаратов методом поверхностной пластической деформации // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 132–136.
2. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
3. Одицов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
4. Одицов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
5. Швецов А.Н., Скуратов Д.Л. Влияние параметров алмазного выглаживания на состояние обработанного поверхностного слоя заготовок из высокопрочной стали 30ХГСН2А-ВД // Вестник машиностроения. 2020. № 5. С. 82–86. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-5-82-86
6. Shvetcov A.N., Skuratov D.L. Investigation of Conditions of Processing Influence on Micro-Hardness Distribution in Surface Layer during Diamond Burnishing of Samples of FeC0.15Cr12Ni2 Steel // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 746, pp. 290-295. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.746.290
7. Shvetcov A.N., Skuratov D.L. Evolution of the Residual Stresses Formation from FeC0.15Cr12Ni2 Steel in the Part Surface During the Diamond Smoothing // Procedia Engineering. 2017. Vol. 176. No. 25, pp. 355–362. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.332
8. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
9. Тотаи А.В. Комплексный анализ состояния поверхностного слоя деталей после алмазного выглаживания // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 12(109). С. 37–47. DOI: 1030987/1999-8775-2021-12-37-47
10. Захаров Е.Н., Усачев Д.В. Подход к оценке уровня качества образцов авиационной техники военного на-

- значения на основе нейроподобных сетей // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 267–280. DOI: 10.34759/vst-2021-4-267-280
11. Справочник конструктора-машиностроителя: В 2 т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. Т. 2. – 944 с.
  12. Zaghal J., Molnár V., Benke M. Improving surface integrity by optimizing slide diamond burnishing parameters after hard turning of 42CrMo4 steel // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 128. No. 5-6, pp. 1-17. DOI: 10.1007/s00170-023-12008-6
  13. Алексеев П.Г. Технология упрочнения деталей машин поверхностной пластической деформацией. – Тула: Изд-во Тул. политехн. ин-та, 1978. – 80 с.
  14. Dzyura V., Maruschak P., Slavov S. et al. Evaluating Some Functional Properties of Surfaces with Partially Regular Microreliefs Formed by Ball-Burnishing // Machines. 2023. Vol. 11. No. 6: 633. DOI: 10.3390/machines11060633
  15. Kluz R., Bucior M., Dzierwa A. et al. Effect of Diamond Burnishing on the Properties of FSW Joints of EN AW-2024 Aluminium Alloys // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 3: 1305. DOI: 10.3390/app13031305
  16. Dezső G., Szigei F., Varga G. Surface Hardness Modification of Selective Laser Melted Ti6Al4V Parts by Sliding Friction Diamond Burnishing // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2022. Vol. 67. No. 1, pp. 59–69. DOI: 10.3311/PPme.2112
  17. Aydın M., Türköz M., Çakan A., Kalyoncu M. Optimization of Roller Burnishing Process Using Bees and Genetic Algorithm // 3rd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (ICAENS – 2022; Konya, Turkey), pp. 650–654.
  18. Attabi S., Himour A., Laouar L., Motallebzadeh A. Mechanical and wear behaviors of 316L stainless steel after ball burnishing treatment // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 15. No. 7, pp. 3255–3267. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.081
  19. Ulhe P.N., Patil U.D., Patil C.R. Optimization of Roller Burnishing Process Parameters on Surface Roughness Using Response Surface Methodology // 9th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC-2019), 2019. Vol. 18. Part 7, pp. 3632–3637. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.295
  20. Bourebia M., Bouri A., Hamadache H. et al. Study of the effect burnishing on superficial hardness and hardening of S355JR steel using experimental planning // Energy Procedia. 2019. Vol. 157, pp. 568–577. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.221
  21. Швецов А.Н. Повышение эффективности процесса алмазного выглаживания деталей ГТД и авиаагрегатов на основе определения рациональных условий обработки: Дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2021. – 229 с.
  22. Technodinamika. Система шасси. Шасси для нового ИЛ-76МД-90А. URL: <http://technodinamika.ru/competencies/systems/shassi>
  23. Резников А.Н. (ред.) Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

## References

1. Komkov V.A., Kokoreva O.G., Kursakov A.V. Investigation of possibilities to harden thin-wall elements of flying vehicles by surface plastic deformation. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 132–136.
2. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodka Yu.D. *Poverkhnostnyy sloi i ekspluatatsionnye svoystva detalei mashin* (Surface layer and operational properties of machine parts), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 240 p.
3. Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem. Spravochnik* (Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation: a Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 328 p.
4. Odintsov L.G. *Finishnaya obrabotka detalei almaznym vyglazhivaniem i vibrovylazhivaniem* (Finishing of parts with diamond burnishing and vibration smoothing), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 160 p.
5. Shvetsov A.N., Skuratov D.L. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 5, pp. 82–86. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-5-82-86
6. Shvetcov A.N., Skuratov D.L. Investigation of Conditions of Processing Influence on Micro-Hardness Distribution in Surface Layer during Diamond Burnishing of Samples of FeC0.15Cr12Ni2 Steel. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 746, pp. 290–295. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.746.290
7. Shvetcov A.N., Skuratov D.L. Evolution of the Residual Stresses Formation from FeC0.15Cr12Ni2 Steel in the Part Surface During the Diamond Smoothing. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 176, no. 25, pp. 355–362. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.332
8. Torbilo V.M. *Almaznoe vyglazhivanie* (Diamond smoothing), Moscow, Mashinostroenie, 1972, 105 p.
9. Totai A.V. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 12(109), pp. 37–47. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-12-37-47
10. Zaharov E.N., Usachev D.V. An approach to the assessment of military-oriented aircraft engineering based on neural-like networks. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 267–280. DOI: 10.34759/vst-2021-4-267-280
11. Dal'skii A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. (eds). *Spravochnik konstruktora-mashinostroytelya. V 2t.* (Handbook of the designer-machine builder. In 2 vols), 5th ed. Moscow, Mashinostroenie, 2001. Vol. 2, 944 p.
12. Zaghal J., Molnár V., Benke M. Improving surface integrity by optimizing slide diamond burnishing parameters after hard

- turning of 42CrMo4 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 128, no. 5-6, pp. 1-17. DOI: 10.1007/s00170-023-12008-6
13. Alekseev P.G. *Tekhnologiya uprochneniya detalei mashin poverkhnostnoi plasticheskoi deformatsiei* (Technology of hardening of machine parts by surface plastic deformation), Tula, Tul'skii politekhnicheskii institut, 1978, 80 p.
  14. Dzyura V., Maruschak P., Slavov S. et al. Evaluating Some Functional Properties of Surfaces with Partially Regular Microreliefs Formed by Ball-Burnishing. *Machines*, 2023, vol. 11, no. 6: 633. DOI: 10.3390/machines11060633
  15. Kluz R., Bucior M., Dzierwa A. et al. Effect of Diamond Burnishing on the Properties of FSW Joints of EN AW-2024 Aluminium Alloys. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 3: 1305. DOI: 10.3390/app13031305
  16. Dezső G., Szigeti F., Varga G. Surface Hardness Modification of Selective Laser Melted Ti6Al4V Parts by Sliding Friction Diamond Burnishing. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 59-69. DOI: 10.3311/PPme.21124
  17. Aydın M., Türköz M., Çakan A., Kalyoncu M. Optimization of Roller Burnishing Process Using Bees and Genetic Algorithm. *3rd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (ICAENS – 2022; Konya, Turkey)*, pp. 650-654.
  18. Attabi S., Himour A., Laouar L., Motallebzadeh A. Mechanical and wear behaviors of 316L stainless steel after ball burnishing treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, no. 7, pp. 3255-3267. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.081
  19. Ulhe P.N., Patil U.D., Patil C.R. Optimization of Roller Burnishing Process Parameters on Surface Roughness Using Response Surface Methodology, *9th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC-2019)*, 2019, vol. 18. Part 7, pp. 3632-3637. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.295
  20. Bourebia M., Bouri A., Hamadache H. et al. Study of the effect burnishing on superficial hardness and hardening of S355JR steel using experimental planning. *Energy Procedia*, 2019, vol. 157, pp. 568-577. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.221
  21. Shvetsov A.N. *Povyshenie effektivnosti protsessaalmaznogo vyglazhivaniya detalei GTD i aviaagregatov na osnove opredeleniya ratsional'nykh uslovii obrabotki* (Improving the efficiency of the diamond smoothing process of GTD parts and aircraft units based on the determination of rational processing conditions). Ph.D. thesis. Samara, Samarskii universitet, 2021, 229 p.
  22. *Technodinamika*. Sistema shassi. Shassi dlya novogo IL-76MD-90A. URL: <http://technodinamika.ru/competencies/systems/shassi>
  23. Reznikov A.N. (ed.) *Abrazivnaya ialmaznaya obrabotka materialov: Spravochnik* (Abrasive and diamond processing of materials. Handbook). Moscow, Mashinostroenie, 1977, 391 p.

Статья поступила в редакцию 11.08.2023; одобрена после рецензирования 08.11.2023; принята к публикации 08.11.2023.

The article was submitted on 11.08.2023; approved after reviewing on 08.11.2023; accepted for publication on 08.11.2023.