

УДК 621.7

Влияние подачи и количества проходов инструмента на упрочнение поверхностного слоя стали AISI 420 выглаживанием синтетическим алмазом

Татаринцев Игорь Витальевич^(*)

frunix@yandex.ru

Кузнецов Виктор Павлович

wpkuzn@mail.ru

SPIN-код: 7321-4466

Воропаев Владимир Валерьевич

sen_vvv@mail.ru

Кузнецов Семен Викторович

УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Рассмотрено упрочнение образцов из стали AISI 420 (химический состав, %: 0,2 C, 12,2 Cr, 0,4 Si, 0,28 Mn, 0,53 Ni) твердостью 470 HB после обработки предварительным чистовым точением и выглаживания инструментом со сферическим индентором радиусом 2 мм из монокристаллического синтетического алмаза с СОТС при 8 технологических режимах, отличающихся величиной подачи ($f = 0,04$ и $0,08$ мм/об) и количеством проходов инструмента ($n = 1, 2, 4, 6$). При всех режимах выглаживания в поверхностном слое стали AISI 420 формируются значительные остаточные сжимающие напряжения. При увеличении числа рабочих ходов индентора наблюдается снижение значений максимальной h_{max} и остаточной h_p глубин вдавливания пирамидки при микроиндентировании, а также рост характеристик твердости, определяемых как методом кинетического микроиндентирования (твердость по Мартенсу, учитывающая не только пластическую, но и упругую деформацию, твердость по Виккерсу и твердость вдавливания H_{IT}), так и по методу остаточного отпечатка (микротвердость по Виккерсу $HV_{0,025}$).

Ключевые слова: выглаживание, синтетический алмаз, упрочнение, подача, количество проходов, сталь

Impact of feed and number of tool passes on hardening of the AISI 420 steel surface layer by synthetic diamond burnishing

Tatarintsev Igor' Vital'yevich^(*)

frunix@yandex.ru

Kuznetsov Viktor Pavlovich

wpkuzn@mail.ru

SPIN-code: 7321-4466

Voropaev Vladimir Valer'yevich

sen_vvv@mail.ru

Kuznetsov Semen Viktorovich

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. This article investigates the hardening of samples made of AISI 420 steel (chemical composition: C: 0.2 %; Cr: 12.2 %; Si: 0.4 %; Mn: 0.28 %; Ni: 0.53 %) with the hardness of 470 HB after machining by preliminary finish turning and burnishing by a tool equipped with a spherical indenter with the radius of 2 mm made of monocrystalline syn-

thetic diamond with technical lubricant-coolants using 8 technological modes of varying feed ($f = 0.04$ and 0.08 mm/rev) and number of tool passes ($n = 1, 2, 4, 6$). All burnishing modes cause formation of significant residual compression stresses in the AISI 420 steel surface layer. Increasing the number of working passes of the indenter decreases the maximum h_{max} and residual h_p indentation depths of the pyramid in the microindentation process, as well as improves hardness characteristics, as detected by kinetic microindentation (Martens hardness test for both plastic and elastic deformation, Vickers hardness test, and indentation hardness H_{IT}) as well as the residual indent method (microhardness as found by a Vickers test $HV_{0.025}$).

Keywords: burnishing, synthetic diamond, hardening, feed, number of passes, steel

Введение. Сталь AISI 420 находит широкое применение в современном машиностроении, например в качестве запорных узлов трубопроводной арматуры и других деталях трибосопряжения [1], поэтому упрочнение поверхностного слоя является актуальной задачей. В работах [2, 3] исследовано наноструктурирующее выглаживание стали 20X13 и цементованной стали 20X, и определена критическая скорость выглаживания без СОТС, равная 14 м/мин, при которой возникает потеря сдвиговой устойчивости. Влияние подачи и количества проходов инструмента на упрочнение поверхностного слоя определено не было. В работе [4] оценку поверхностного слоя стали AISI 304 после наноструктурирующего выглаживания проводили с помощью измерения микротвердости по глубине, и определения значения интегральной ширины рентгеновских линий (110) α , отражающая плотность дислокаций. Исследование материала поверхностного слоя при помощи кинетического микроиндентирования приведено в работе [5].

Поэтому целью данной работы является установление влияния подачи и количества проходов инструмента на упрочнение поверхностного слоя стали AISI 420 выглаживанием синтетическим алмазом.

Материалы и методы. Поверхности образцов из стали AISI 420 (химический состав, %: 0,2 С, 12,2 Cr, 0,4 Si, 0,28 Mn, 0,53 Ni) твердостью 470 НВ были обработаны чистовым точением и выглаживанием инструментом со сферическим индентором радиусом 2 мм из монокристаллического синтетического алмаза с СОТС при 8 технологических режимах, отличающиеся величиной подачи ($f = 0,04$ и $0,08$ мм/об) и количеством рабочих ходов инструмента ($n = 1, 2, 4, 6$). Скорость скольжения индентора при выглаживании составляла 20 м/мин. Чистовое точение проводилось инструментом Sandvik Wnga с СОТС «Технокат 3350» со скоростью 80 м/мин, подачей 0,06 мм/об и припуском 0,5 мм. Шероховатость после чистового точения Ra составила 0,32 мкм.

Упрочнение поверхностного слоя после обработок образцов-дисков исследовалось методами кинетического микроиндентирования с записью диаграммы нагружения, микродюраметрии и рентгеноструктурного анализа с определением интегральной ширины линии (110) α и остаточных напряжений.

Кинетическое микроиндентирование образцов проводили на измерительной системе Fischerscope HM2000 XYm с использованием пирамидки Виккерса

и программного обеспечения WIN-HCU при максимальной нагрузке на пирамидку 0,245 Н (25 гс). Калибровку прибора осуществляли на калибровочной пластине типа ВК7. Определяли твердость по Мартенсу НМ при максимальной нагрузке, твердость по Мартенсу НМs, твердость вдавливания Н_{IT}, твердость по Виккерсу НV 0,025, модуль упругости при вдавливании $E_{IT}/(1-\nu_s^2)$, общую механическую работу вдавливания W_t , работу упругой деформации W_e , максимальную глубину вдавливания пирамидки h_{max} . Погрешность измерений определяли с доверительной вероятностью $p = 0,95$.

На диске из стали AISI 420 измерения микротвердости и кинетическое микроиндентирование проводили в центральной части каждого из восьми секторов, соответствующих исследуемым технологическим режимам.

Рентгенографическое исследование ширины линии (110) α и остаточных макронапряжений проводили на дифрактометре SHIMADZU XRD-7000S с использованием излучения Cr-K α . Для рентгенографических исследований вырезали образцы размером 7×7 мм из диска из центра каждого сектора. Перед исследованием невыглаженные участки поверхности образцов покрывались слоем лака для защиты от рентгеновского излучения, чтобы предотвратить их влияние на результаты.

Результаты. Увеличение количества рабочих ходов индентора при выглаживании обуславливает снижение значений максимальной и остаточной глубины вдавливания индентора h_{max} и h_p , что вызвано увеличением деформационного упрочнения поверхностного слоя и, возможно, увеличением его толщины. При этом увеличение поперечной подачи индентора f от 0,04 до 0,08 мм/об приводит к некоторому увеличению как максимальной, так и остаточной глубины вдавливания пирамидки Виккерса h_{max} и h_p .

Из рис. 1 и 2 следует, что при увеличении числа рабочих ходов индентора наблюдается рост твердости по Мартенсу НМ при максимальной нагрузке (учитывающей не только пластическую, но и упругую деформацию), твердости по Мартенсу НМs, твердости по Виккерсу НV0,025 и твердости вдавливания Н_{IT} (см). Значения рассматриваемых прочностных характеристик при поперечной подаче индентора $f = 0,04$ мм/об несколько выше, чем при подаче $f = 0,08$ мм/об.

Из рис. 3 следует, что контактный модуль упругости E^* изменяется не существенно и не проявляет выраженной зависимости от количества ходов индентора при выглаживании, однако при подаче индентора $f = 0,08$ мм/об его уровень немного выше, чем при подаче $f = 0,04$ мм/об.

Общая механическая работа вдавливания W_t , состоящая из работы пластической деформации и работы упругого восстановления, снижается при увеличении количества ходов индентора при выглаживании как для подачи $f = 0,04$ мм/об, так и для подачи $f = 0,08$ мм/об (рис. 4, а, б). Такое изменение общей механической работы вдавливания W_t объясняется повышением прочности и уменьшением пластичности поверхностного слоя стали при увеличении кратности нагружения, что приводит к его меньшей деформации в процессе микроиндентирования.

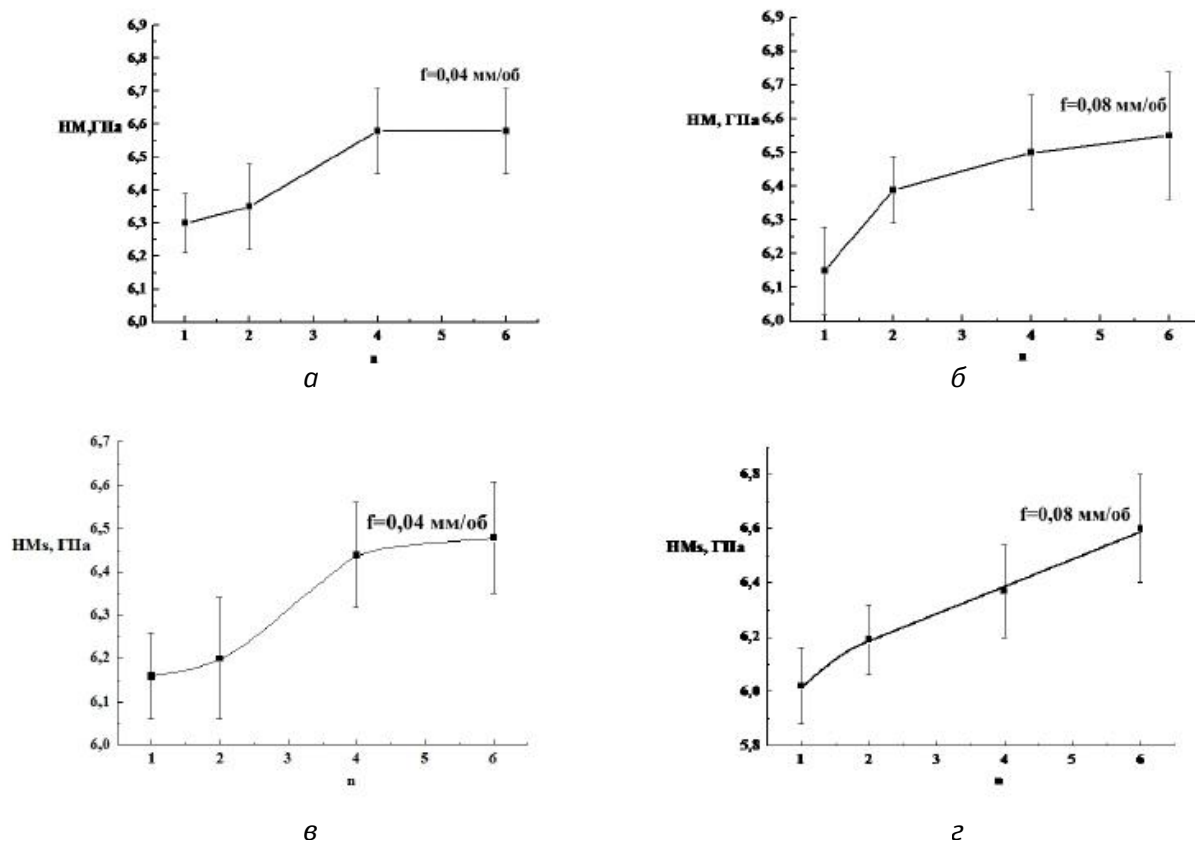


Рис. 1. Влияние количества проходов индентора n при выглаживании образца из стали AISI 420 на твердость по Мартенсу HM при максимальной нагрузке (а, б) и твердость по Мартенсу HMs (в, г) при подачах индентора 0,04 мм/об (а, в) 0,08 мм/об (б, г)

На рис. 4 в, г видно, что упругая деформация вдавливания W_e с ростом количества ходов индентора изменяется неоднозначно для различной подачи ($f = 0,04$ мм/об и $f = 0,08$ мм/об). Такой неоднозначный характер изменения величины W_e обусловлен тем, что она зависит от отношения твердости, которая повышается с увеличением числа ходов индентора (рис. 2), к контактно-му модулю упругости материала, который изменяется неоднозначно и незначительно с изменением количества ходов (рис. 3).

На рис. 5 представлены зависимости от числа проходов индентора расчетных параметров Re (упругое восстановление), H_{IT}/E^* (удельная контактная твердость) и H_{IT}^3/E^{*2} , которые характеризуют способность материала сопротивляться контактному механическому воздействию без остаточного формоизменения (пластического деформирования). Из рисунка 5, а, в, д следует, что при подаче индентора $f = 0,04$ мм/об с ростом кратности деформационного воздействия от $n = 1$ до $n = 6$ не наблюдается однозначного изменения упругого восстановления Re , а отношения H_{IT}/E^* и H_{IT}^3/E^{*2} изменяются очень незначительно.

Однако при подаче индентора $f = 0,08$ мм/об рост кратности деформационного воздействия от $n = 1$ до $n = 4$ приводит к повышению параметров Re , H_{IT}/E^* и H_{IT}^3/E^{*2} , дальнейшее же увеличение числа проходов индентора до $n = 6$ практически не изменяет значений данных параметров (рис. 5, б, г, е).

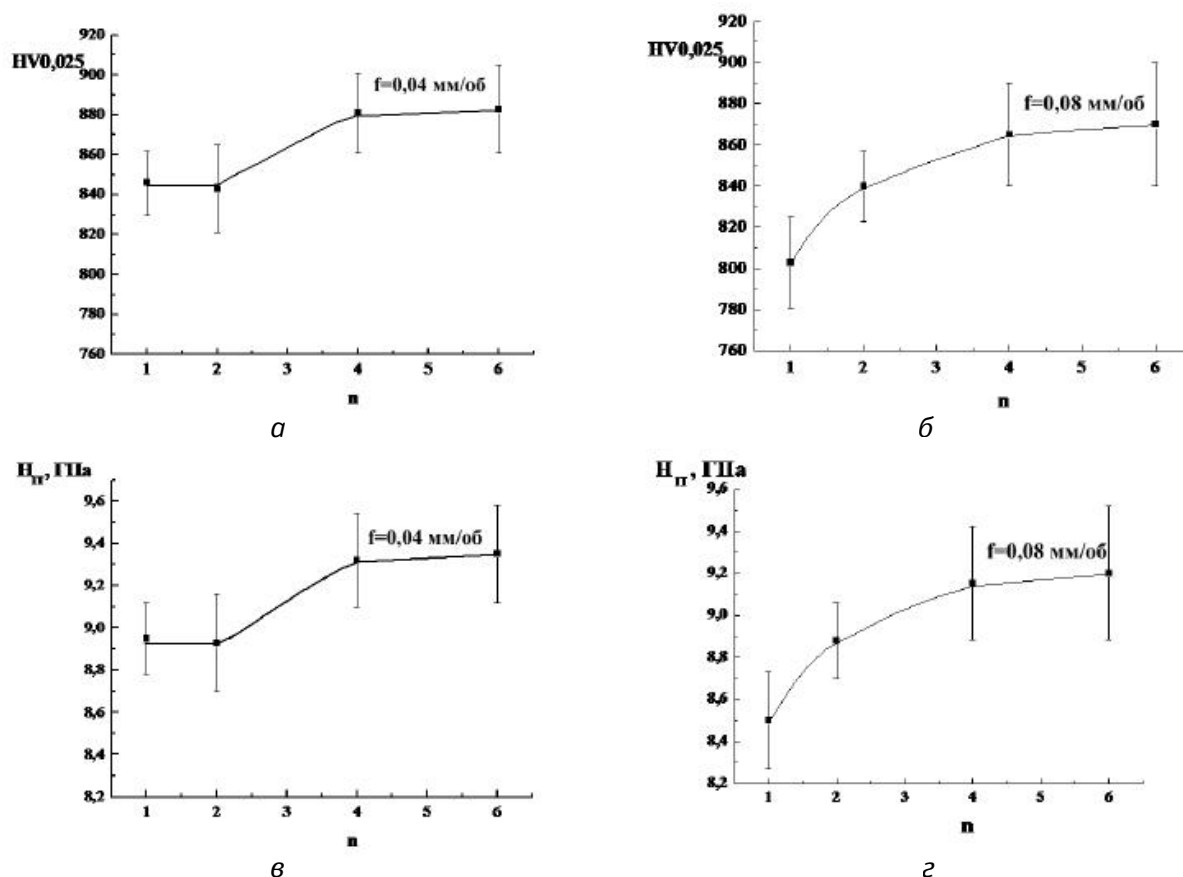


Рис. 2. Влияние количества проходов индентора n при выглаживании образца из стали AISI 420 на твердость по Виккерсу $HV_{0,025}$ (а, б) и твердость вдавливания при максимальной нагрузке H_T (в, г) при подачах индентора $f = 0,04$ мм/об (а, в) и $f = 0,08$ мм/об (б, г)

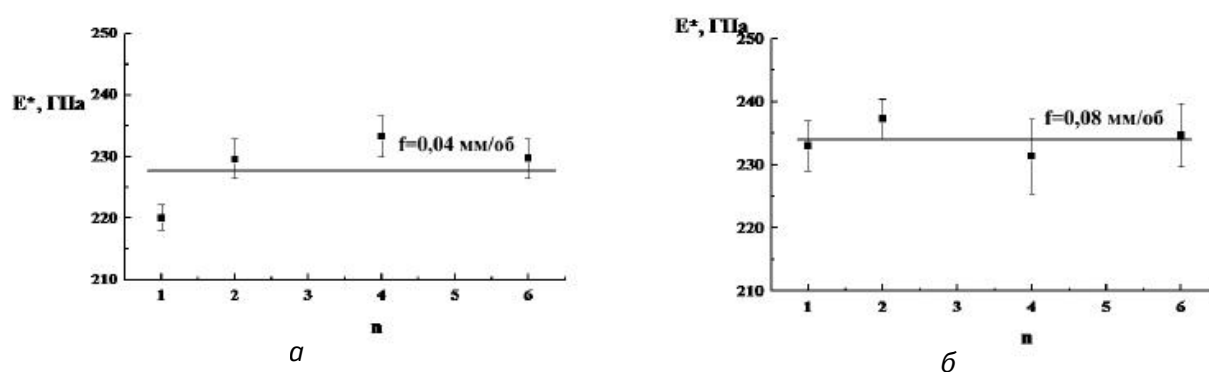


Рис. 3. Влияние количества проходов индентора n при выглаживании образца из стали AISI 420 на контактный модуль упругости E^* при подачах индентора $f = 0,04$ мм/об (а) и $f = 0,08$ мм/об (б)

Результаты измерений микротвердости и рентгеноструктурного анализа участков поверхности образца из стали AISI 420 после выглаживания индентором из синтетического алмаза при нагрузке $F = 300$ Н, скорости выглаживания $V = 20$ м/мин с СОТС при подачах индентора $f = 0,04$ и $0,08$ мм/об и количестве рабочих ходов индентора (кратности нагружения) n от 1 до 6 представлены в таблице и на рис. 6–8.

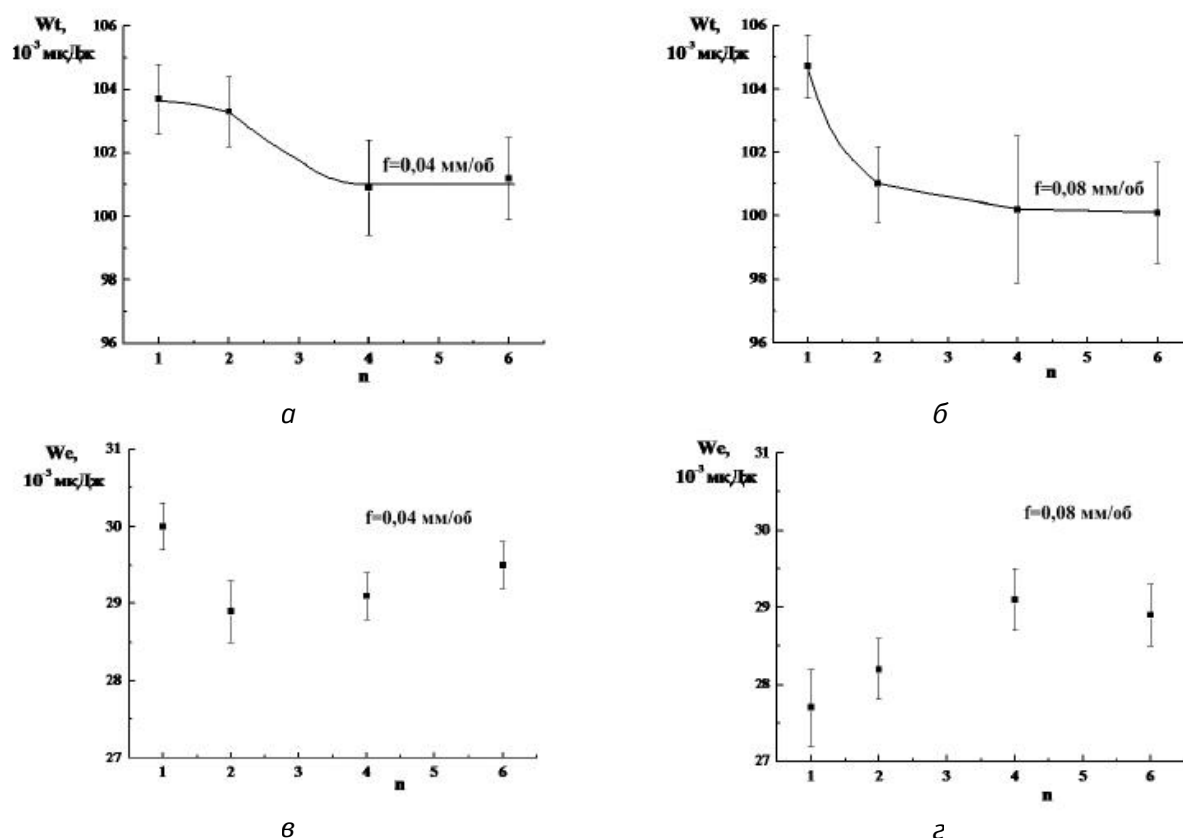


Рис. 4. Влияние количества проходов индентора n при выглаживании образца из стали AISI 420 на общую механическую работу вдавливания W_t (а, б) и работу упругой деформации W_e (в, г) при подаче индентора $f=0,04 \text{ мм/об}$ (а, в) $f=0,08 \text{ мм/об}$ (б, г)

Результаты измерений микротвердости и рентгеноструктурного анализа участков поверхности образца из стали AISI 420 после выглаживания

Сектор	Подача f , мм/об	Число ходов n	Микротвердость HV 0,025	Ширина линии B(110) α , мин	Остаточные напряжения σ , МПа
1	0,04	1	840 $\pm$ 14	49	-1380
2		2	838 $\pm$ 18	51	-1160
3		4	856 $\pm$ 15	54	-1510
4		6	869 $\pm$ 12	51	-1370
5	0,08	1	804 $\pm$ 16	52	-1350
6		2	817 $\pm$ 12	55	-1120
7		4	824 $\pm$ 12	54	-1130
8		6	832 $\pm$ 9	50	-1260

Микротвердость HV0,025, интегральная ширина рентгеновской линии B(110) α и остаточные напряжения σ образца из стали AISI 420 после выглаживания при различных технологических режимах индентором из синте-

тического алмаза радиусом 2 мм при нагрузке 300 Н и скорости 20 м/мин с охлаждением СОТС.

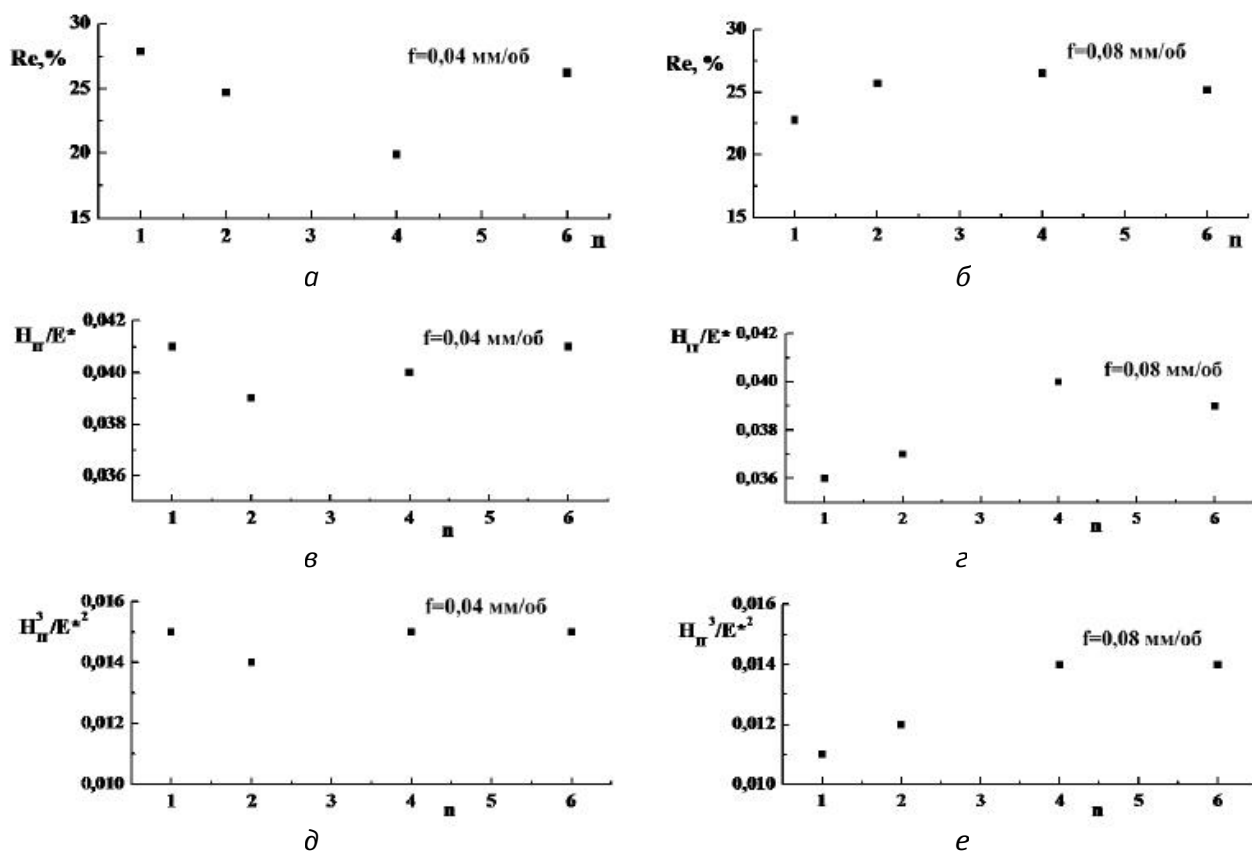


Рис. 5. Влияние количества проходов индентора n при выглаживании образца стали AISI 420 на параметры Re (а, б), H_{II}/E^* (в, г) и H_{II}^3/E^{*2} (д, е) при подачах $f = 0.04$ мм/об (а, в, д) и $f = 0.08$ мм/об (б, г, е)

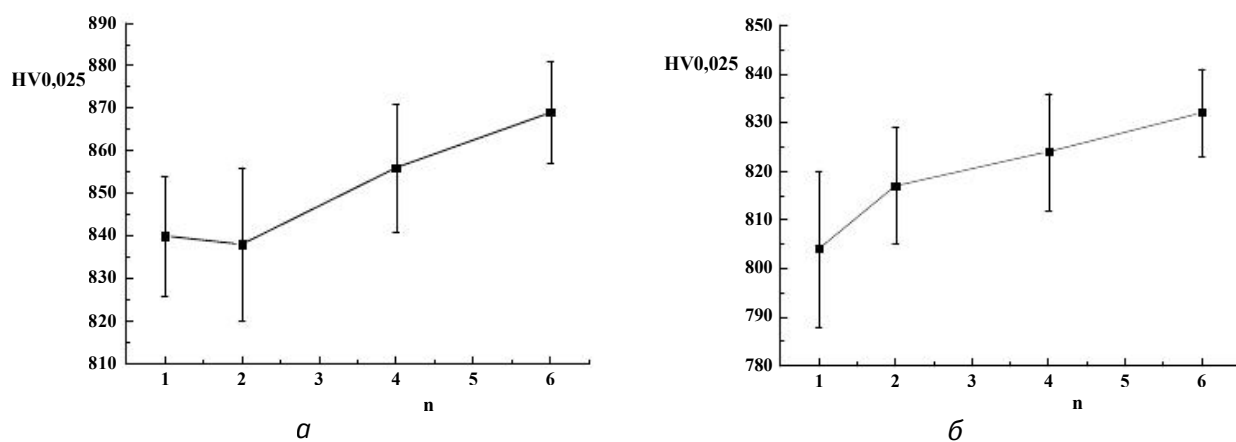


Рис. 6. Влияние количества проходов индентора n при выглаживании образца из стали AISI 420 на микротвердость при подачах индентора $f = 0.04$ мм/об (а) и $f = 0.08$ мм/об (б)

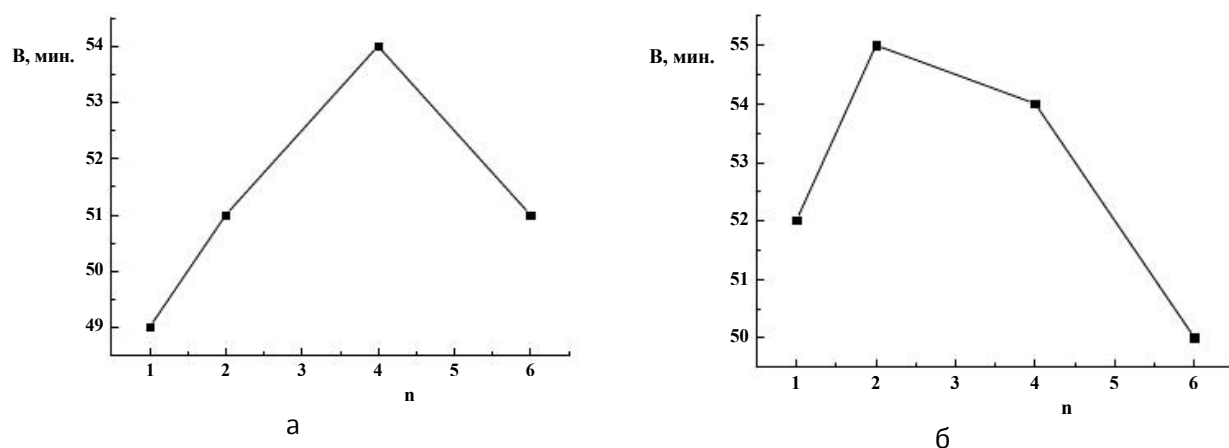


Рис. 7. Влияние количества проходов индентора n при выглаживании образца из стали AISI 420 на интегральную ширину рентгеновской линии $B(110)\alpha$ при подачах индентора $f = 0,04$ мм/об (а) и $f = 0,08$ мм/об (б)

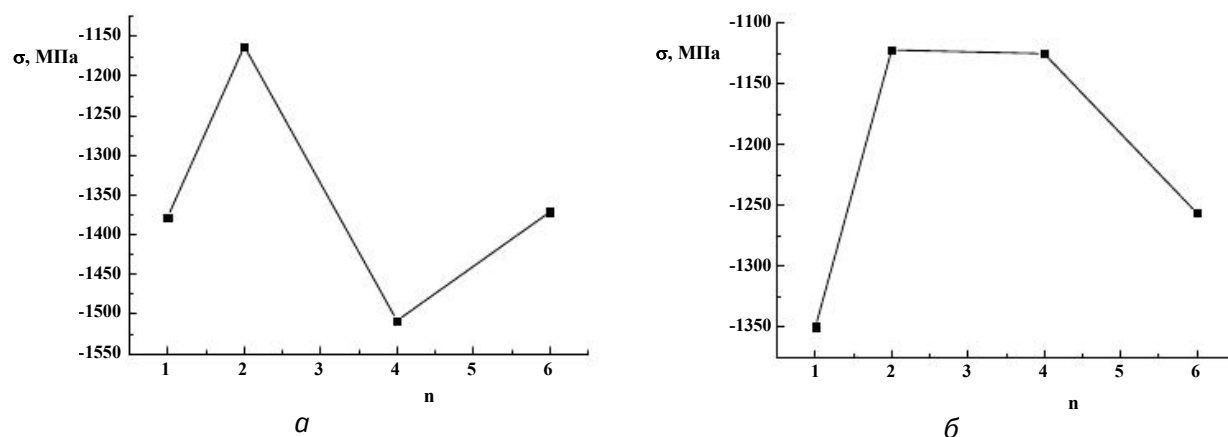


Рис. 8. Влияние количества проходов индентора n при выглаживании образца из стали AISI 420 на остаточные напряжения σ при подачах индентора $f = 0,04$ мм/об (а) и $f = 0,08$ мм/об (б)

Представленные в таблице и на рис. 6 данные показывают, что при подаче индентора $f = 0,04$ мм/об с увеличением проходов индентора из синтетического алмаза более двух происходит рост микротвердости, а при подаче $f = 0,08$ мм/об непрерывный рост микротвердости наблюдается при увеличении количества проходов от 1 до 6.

При этом интегральная ширина B рентгеновской линии $(110)\alpha$ -фазы составляет $B = 49\text{--}54$ минуты для подачи $f = 0,04$ мм/об и $B = 50\text{--}55$ минут для подачи $f = 0,08$ мм/об (табл., рис. 7).

Из таблицы и рисунка 8 следует также, что при всех исследованных режимах выглаживания в поверхностном слое стали AISI 420 формируются остаточные сжимающие напряжения. Их уровень составляет от -1160 до -1510 МПа для подачи $f = 0,04$ мм/об и от -1120 до -1350 МПа для подачи $f = 0,08$ мм/об.

Заключение. В результате проведенных экспериментов по выглаживанию индентором из синтетического алмаза с жидкой COTC поверхности за-

каленной низкоуглеродистой коррозионностойкой стали AISI 420 установлено следующее.

При увеличении числа рабочих ходов индентора наблюдается снижение значений максимальной $h_{\max}$ и остаточной h_p глубин вдавливания пирамидки Виккерса при микроиндентировании, а также рост характеристик твердости, определяемых как методом кинетического микроиндентирования (твердость по Мартенсу, учитывающая не только пластическую, но и упругую деформацию, твердость по Виккерсу и твердость вдавливания H_{IT}), так и по методу остаточного отпечатка (микротвердость по Виккерсу HV0,025); значения рассматриваемых прочностных характеристик при поперечной подаче индентора $f = 0,04$ мм/об несколько выше, чем при подаче $f = 0,08$ мм/об.

В зависимости от числа проходов индентора не выявлено закономерного изменения контактного модуля упругости E^* , уровень которого несколько выше при подаче индентора $f = 0,08$ мм/об, чем при подаче $f = 0,04$ мм/об.

С увеличением количества ходов индентора отмечается снижение общей механической работы вдавливания Wt и неоднозначный характер изменений упругой деформации вдавливания We .

Анализ расчетных параметров Re (упругое восстановление), отношений H_{IT}/E^* (удельная контактная твердость) и H_{IT}^3/E^{*2} , характеризующих сопротивление поверхности контактному механическому воздействию без пластического деформирования, показал, что при выглаживании стали AISI 420 с подачей $f = 0,04$ мм/об с ростом числа проходов инструмента от 1 до 6 не наблюдается однозначного изменения упругого восстановления Re , а отношения H_{IT}/E^* и H_{IT}^3/E^{*2} изменяются очень незначительно; при подаче $f = 0,08$ мм/об рост влияния числа проходов от 1 до 4–6 приводит к повышению параметров Re , H_{IT}/E^* и H_{IT}^3/E^{*2} , что свидетельствует о повышении способности стали сопротивляться пластическому деформированию.

После выглаживания стали AISI 420 с различными подачами наблюдаются близкие уровни интегральной ширины B рентгеновской линии (110) α -фазы ($B = 49$ – 54 мин для подачи $f = 0,04$ мм/об и $B = 50$ – 55 мин для подачи $f = 0,08$ мм/об) что свидетельствует о приблизительно одинаковом уровне плотности дислокаций в поверхностном слое после выглаживания на всех рассмотренных технологических режимах.

При всех режимах выглаживания в поверхностном слое стали AISI 420 формируются значительные остаточные сжимающие напряжения от -1160 до -1510 МПа для подачи $f = 0,04$ мм/об и σ от -1120 до -1350 МПа для подачи $f = 0,08$ мм/об.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (номер темы FEUZ-2024-0020) соглашение Министерства науки и высшего образования № 075-03-2025-258/5 от 07.07.2025.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Татаринцев И.В., Кузнецов В.П., Воропаев В.В., Дмитриева О.В., Корелин А.В. Влияние выглаживания и деформирующего профилирования смазочных микровпадин на параметры топографии и упрочнение плосковершинной поверхности стали 40X13. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2023, т. 19, № 12 (228), с. 543–550.
- [2] Kuznetsov V.P., Makarov A.V., Psakhie S.G., Savrai R.A., Malygina I.Yu., Davydova N.A. Tribological aspects in Nanostructuring burnishing of structural steels. *Physical Mesomechanics*, 2014, vol. 17, no. 4, pp. 250–264. <https://doi.org/10.1134/s102995991404002x>
- [3] Kuznetsov V.P., Tarasov S. Yu., Dmitriev A.I. Nanostructuring burnishing and subsurface shear instability. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 217, pp. 327–335. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.023>
- [4] Kuznetsov V., Tatarintsev I., Voropaev V., Skorobogatov A. Surface nanocrystallization and improvement of the mechanical and tribological properties of AISI 304 steel using multi-pass nanostructuring burnishing. *Materials*, 2024, no. 17 (22), art. no. 5656.
- [5] Кузнецов В.П., Скоробогатов А.С. *Технологии формирования и методы исследования наноструктурированного поверхностного слоя конструкционных материалов*. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2020, 188 с.