

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.7:621.644:621.79

doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-3-11

Определение остаточного напряженного состояния патрубков высокого давления при алмазном выглаживании

С.А. Зайдес, А.Н. Машуков

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Determination of the Residual Stress State of High-Pressure Nozzles During Diamond Smoothing

S.A. Zaydes, A.N. Mashukov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University

Проведено моделирование финишной отделочно-упрочняющей обработки осесимметричных цилиндрических деталей типа арматурных узлов высокого давления с уплотнением металл по металлу патрубка и штока. Разработана конечно-элементная модель алмазного выглаживания, дающая возможность определять напряженное состояние в очаге деформации в зависимости от подачи, угла отклонения рабочего инструмента, его усилия прижатия к заготовке и глубины внедрения в материал детали. Анализ результатов моделирования выявил диапазон оптимальных режимов для алмазного выглаживания. Конечно-элементное моделирование с применением программы ANSYS Workbench Mechanical позволило апробировать те режимы выглаживания, которые трудно реализовать экспериментально. Выявлены наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на формирование максимальных остаточных напряжений в поверхностном слое затворных узлов арматуры высокого давления. Определены максимальные сжимающие остаточные напряжения, значения которых не превышают предел текучести материала затворных узлов.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, интенсивность напряжений, алмазное выглаживание, упрочняющая обработка, арматура высокого давления, остаточные напряжения

The paper presents the results of a study that examines modelling of the polishing and hardening treatment of axisymmetric cylindrical parts such as high-pressure fittings with metal seals on the pipe and the rod. A finite element model of the diamond smoothing process was developed, which allowed one to determine the stress state in the deformation zone depending on the feed rate, tool deflection angle, pressing force, and depth of penetration into the material of the part. The analysis of the modelling results helped to identify a range of optimal modes for diamond smoothing. By using finite element modelling in ANSYS Workbench Mechanical it was possible to test those smoothing modes that were difficult to test experimentally. The study identified the most significant factors that influenced the formation of the maximum values of residual stresses in the surface layer of gate assemblies

of high-pressure valves. The maximum values of compressive residual stresses, the value of which did not exceed the yield strength of the material were determined.

Keywords: finite element modeling, stress intensity, diamond smoothing, hardening treatment, high-pressure fittings, residual stresses

Современная трубопроводная арматура высокого давления (ТАВД) — важное звено, обеспечивающее безопасную эксплуатацию нефтехимической и нефтегазоперерабатывающей промышленности.

Основная проблема эксплуатации такой арматуры заключается в ее преждевременном выходе из строя в результате потери герметичности под воздействием высоких давлений, температур, коррозионного и эрозионного влияния нефтехимической среды. Главными звеньями ТАВД являются ее затворные узлы — патрубок и шток.

Низкое качество поверхности (большие волнистость и шероховатость) затворных узлов, слабое упрочнение поверхностного слоя и высокий уровень растягивающих остаточных напряжений (ОН), полученный после обработки патрубков и штоков при изготовлении, приводят к преждевременному износу их поверхности.

Существуют различные методы повышения качества поверхности затворных узлов: обкатка шариками и роликами, полирование, шлифование, дробеструйная обработка, охватывающее деформирование, осциллирующее выглаживание, наплавка и др. [1–5].

Алмазное выглаживание относится к перспективным методам повышения износостойкости затворных узлов ТАВД, улучшения качества их поверхности, снижения ее шероховатости и увеличения уровня сжимающих ОН на уплотнительной поверхности [6].

Экспериментальные исследования процессов поверхностного пластического упрочнения затворных узлов ТАВД представляют собой сложные и ресурсоемкие способы поиска оптимальных режимов, позволяющих упрочнять и повышать качество их поверхности. Алмазное выглаживание [6] не является исключением.

Существует много методов определения уровня ОН в деталях арматуры. Среди неразрушающих известны такие методы, как рентгеновский, вихрековый, лазерной дифрактометрии, метод шумов Баркгаузена [7] и др.

К основным недостаткам наиболее распространенных неразрушающих методов определения ОН относятся низкая проникающая спо-

собность, высокая погрешность и сложность подготовки образцов. Использование разрушающих методов измерения уровня напряжений, полученных после алмазного выглаживания, также требует изготовления специальных образцов.

Избежать подобных осложнений при подборе рациональных режимов выглаживания можно с помощью конечно-элементного моделирования процесса в специализированном программном обеспечении [8–10].

Цель исследования — определить влияние основных параметров алмазного выглаживания на ОН в патрубках ТАВД по результатам конечно-элементного моделирования.

Методика исследования и моделирования.

Для определения влияния параметров выглаживания на напряженно-деформированное состояние патрубка ТАВД использовано компьютерное моделирование в расчетно-аналитических программах.

Моделирование процесса алмазного выглаживания проведено с помощью метода конечных элементов, суть которого заключается в разбиении модели на множество элементов с конечными размерами (рис. 1) [11, 12]. В качестве программного обеспечения выбран рас-

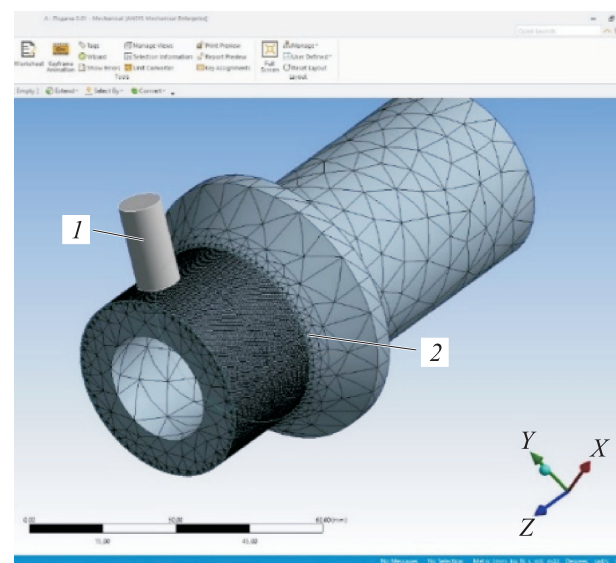


Рис. 1. Геометрическая модель алмазного выглаживателя 1 и патрубка 2 ТАВД

четно-аналитический комплекс ANSYS версии 2019.R3 (19.5). Для решения поставленной задачи использован модуль ANSYS Workbench Mechanical [13].

Проведены исследования влияния упрочняющей обработки алмазным выглаживанием на остаточное напряженное состояние патрубков ТАВД. Рассмотрены следующие параметры динамической упрочняющей обработки: угол установки алмазного выглаживателя (АВ), усилие его прижатия к заготовке (далее усилие прижатия) F , подача S и натяг инструмента t .

Исходный угол установки АВ принят равным 90° (перпендикулярно поверхности выглаживания), коэффициент трения (алмаза по стали) в зоне контакта $f = 0,15$. Принципиальная схема нагружения патрубка при алмазном выглаживании приведена на рис. 2.

В качестве рабочего инструмента использован технический алмаз со свойствами абсолютно твердого недеформируемого тела. Форма инструмента представляла собой конический выглаживатель диаметром 10 мм, имеющий наконечник в виде шара радиусом $R = 0,7$ мм. Угол при вершине конуса АВ составлял 120° .

Так как уплотнительная поверхность седла патрубка очень мала и сравнима с размерами АВ, отработка режимов выглаживания поверхности проведена на наружной поверхности патрубка. В качестве рабочей детали использован патрубок DN40 ТАВД, изготовленный из стали 20Х13 (см. рис. 1, 2) и представляющий собой цилиндр с внутренним отверстием. Наружный диаметр цилиндра составлял 40 мм, толщина стенки — 18 мм.

Построение исходной модели выполнено в программе Autodesk Inventor, корректировка геометрии — в модуле программы ANSYS Design modeler.

Для уточнения механических свойств проведены механические испытания материала — стали 20Х13, из которой изготовлены узлы ТАВД. Построена диаграмма испытания материала на растяжение. По результатам механических испытаний определены предел текучести материала для стали 20Х13 ($\sigma_t = 1202$ МПа) и предел прочности ($\sigma_b = 1500$ МПа). Сталь мартенситного класса 20Х13 является хорошо упрочняющимся упругопластическим материалом. Модуль упругости такой стали $E = 2,18 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

При моделировании процесса выглаживания частота вращения детали n составляла

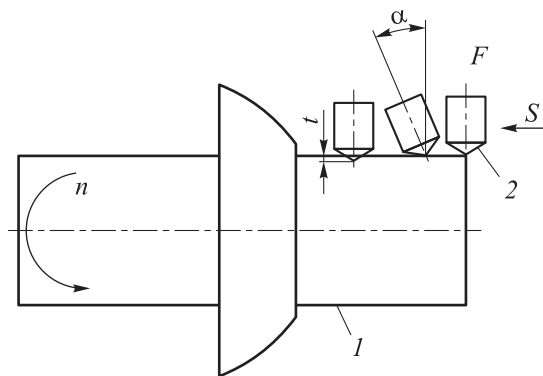


Рис. 2. Принципиальная схема нагружения патрубка при алмазном выглаживании:
1 — патрубок ТАВД; 2 — АВ

80 мин⁻¹. В качестве исходных приняты следующие режимы упрочнения: подача инструмента $S = 0,01$ мм/об, усилие прижатия $F = 150$ Н, температура выглаживания — 22°C , угол установки АВ относительно поверхности заготовки — 90° . При моделировании отклоняли АВ от заготовки на угол $\alpha = 0 \dots 45^\circ$ как по ходу вращения заготовки, так и против (см. рис. 2).

Углы поворота алмаза задавали по направлению вращения заготовки и против этого направления. Кроме того, в реальных условиях выглаживания контактного пояса необходимо отклонять рабочий инструмент по направлению подачи (угол со знаком плюс) и против направления подачи (угол со знаком минус).

Граничные условия — контактирующие поверхности, углы наклона, смещения инструмента — задавали в соответствии с принятой схемой (см. рис. 2). Для увеличения точности расчетов при решении задачи по результатам проведенных исследований вычислен необходимый размер ячейки сетки, при котором полученные значения напряжений изменяются незначительно. Размер ячейки сетки составил 0,073 мм, количество элементов сетки более 200 000. Форма ячеек сетки поверхности — квадрат, в объеме материала — куб.

Результаты моделирования. При упрочнении деталей поверхностным пластическим деформированием состояние поверхностного слоя материала можно разделить на временное и остаточное. При воздействии выглаживателя в поверхностных слоях материала детали формируются временные напряжения, а после снятия нагрузки сохраняются остаточные.

Временные напряжения оказывают влияние на энергосиловые характеристики процесса,

степень и глубину упрочненного слоя, давление в зоне контакта, шероховатость поверхности заготовки, прочность и стойкость инструмента [13, 14].

Для оценки остаточного напряженного состояния используют ОН: осевые σ_z , тангенциальные σ_φ и радиальные σ_r . Объемное напряженное состояние детали в каждой точке оценивают по интенсивности ОН [15]

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}.$$

На рис. 3 в качестве примера показано поле временных напряжений в продольном направлении образца при следующих режимах выглаживания: усилие прижатия АВ $F = 150$ Н, подача АВ $S = 10$ мкм/об, частота вращения патруб­ка $n = 80$ мин⁻¹. Видно, что в продольном направлении образца временные напряжения распределены неравномерно.

При алмазном выглаживании в поверхностном слое заготовки патруб­ка ТАВД формируются сжимающие ОН, а на удалении от поверхности заготовки в глубине материала — растягивающие ОН.

На первом этапе исследования получены зависимости максимальной интенсивности ОН и максимальных радиальных σ_r , осевых σ_z , тангенциальных σ_φ сжимающих ОН от усилий прижатия и натяга АВ (рис. 4, а–в).

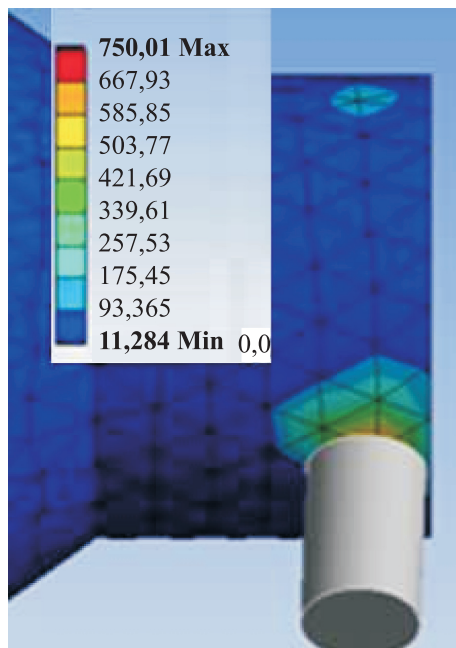


Рис. 3. Поле временных напряжений, МПа, в продольном направлении образца

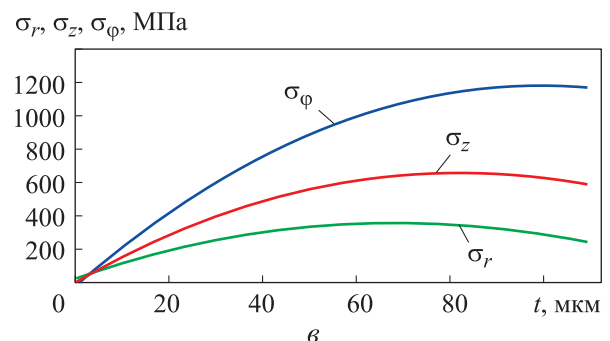
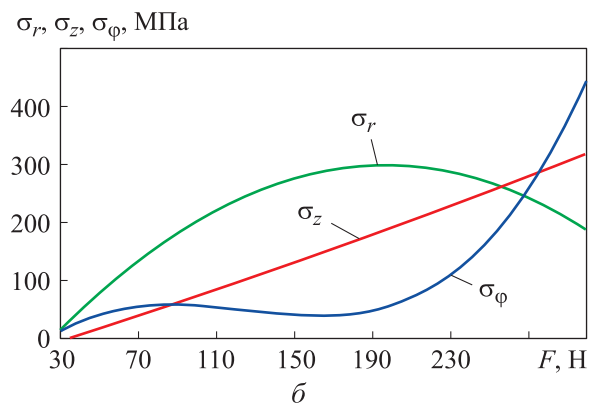
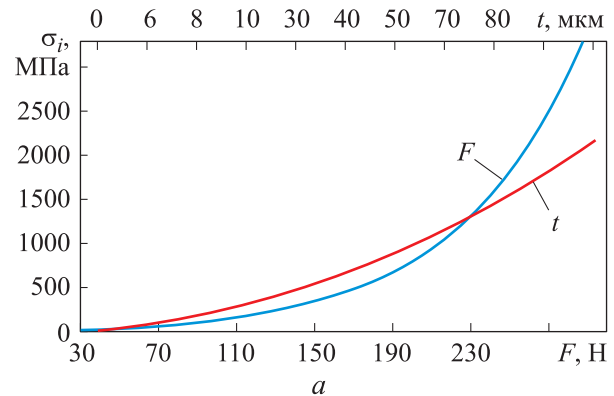


Рис. 4. Результаты первого этапа исследования: а — зависимость максимальной интенсивности ОН σ_i от усилия прижатия F и натяга t АВ; б и в — зависимости максимальных радиальных σ_r , осевых σ_z и тангенциальных σ_φ сжимающих ОН от усилий прижатия F и натяга t АВ соответственно

Как видно из рис. 4, с увеличением усилия прижатия от 30 до 400 Н максимальные осевые σ_z и тангенциальные σ_φ сжимающие ОН равномерно повышаются, радиальные ОН σ_r возрастают не столь значительно. При натяге $t > 72$ мкм интенсивность ОН превышает предел текучести, и материал начинает разрушаться.

Рост максимальных радиальных, тангенциальных и осевых сжимающих ОН происходит до натяга $t = 75$ мкм. Затем ОН снижаются, и вследствие разрушения материала начинают преобладать растягивающие ОН.

На втором этапе исследования получены зависимости максимальной интенсивности и максимальных радиальных σ_r , осевых σ_z , тангенциальных σ_φ ОН от подачи и углов наклона АВ относительно направлений вращения заготовки и подачи (рис. 5).

Результаты второго этапа исследования хорошо коррелируют с физическими закономерностями возникновения ОН. Как видно из рис. 5, а и б, наибольшая интенсивность напряжений возникает при подаче $S = 10 \dots 70$ мкм/об. Максимальные сжимающие осевые

ОН σ_z в материале заготовки патрубка достигают наибольшего значения при подаче $S = 70 \dots 90$ мкм/об. При подаче $S > 0,1$ мм/об максимальные сжимающие осевые ОН снижаются на 50 %, а при $S = 10 \dots 7$ мкм/об — повышаются на 5 %.

Также установлено, что осевые ОН, полученные при моделировании, близки к экспериментальным значениям $\sigma_{z \text{экс}}$ (см. рис. 5, б).

Анализ результатов расчетов показал, что снижение подачи менее 0,007 мм/об является нецелесообразным, так как имеет место явление

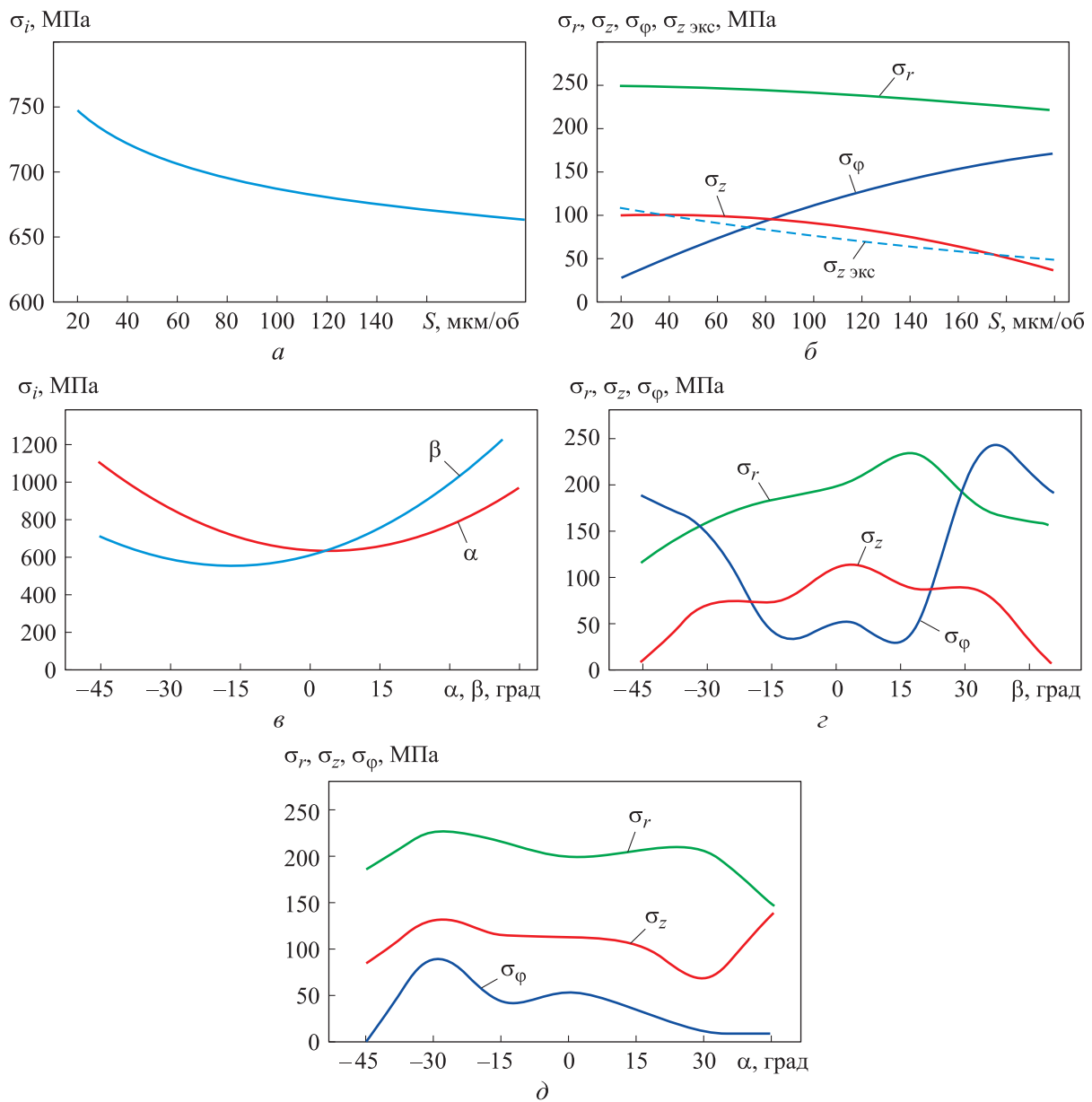


Рис. 5. Результаты второго этапа исследования:
 а и в — зависимости максимальной интенсивности ОН от подачи S и углов наклона АВ относительно направлений вращения заготовки β и подачи α соответственно;
 б, г, д — зависимости максимальных радиальных σ_r , осевых σ_z , тангенциальных σ_φ сжимающих ОН от подачи S и углов наклона АВ относительно направлений вращения заготовки β и подачи α соответственно

перенаклепа (см. рис. 5 а, б), вследствие чего снижаются ОН, и разрушается поверхностный слой металла. При подаче $S > 100$ мкм/об (см. рис. 5, б) также происходит уменьшение ОН. Это объясняется тем, что алмаз не успевает упрочнять поверхностный слой детали, прокаливая дальше по заготовке.

На практике (вследствие технических возможностей станков с ЧПУ) сложно реализовать $S < 10$ мкм/об, поэтому можно считать данную подачу наиболее рациональной при проведении алмазного выглаживания.

При повороте АВ на угол более 45° (рис. 5, з) напряжения превышают предел прочности материала, что приводит к разрушению поверхностного слоя детали. Поворот рабочего инструмента относительно направления вращения заготовки и направления подачи оказывает неоднозначное влияние на компоненты ОН (рис. 5, з, д).

На третьем этапе исследования получена зависимость глубины пластической деформации от усилия прижатия АВ (рис. 6). Как показали результаты компьютерного моделирования, глубина пластической деформации материала затворных узлов зависит от режимов обработки. Наибольшее влияние на глубину пластической деформации оказывают подача, натяг и усилие прижатия АВ.

Как следует из рис. 6, максимально возможная глубина пластической деформации до начала разрушения поверхностного слоя детали составляет 120 мкм (при глубине деформации больше этого значения усилие прижатия F возрастает, превышая 240 Н). Это приводит к повышению интенсивности ОН более предела текучести материала патрубка высокого давления (1202 МПа) при пределе прочности 1500 МПа (см. рис. 4, а).

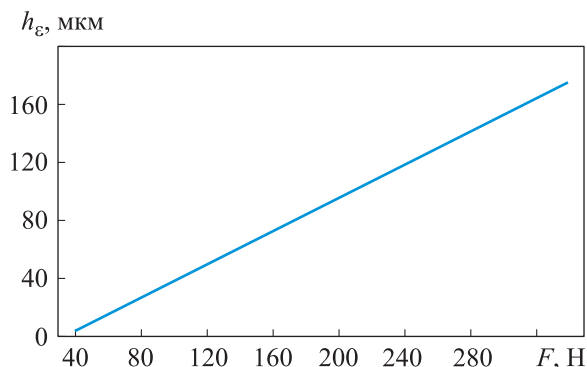


Рис. 6. Зависимость глубины пластической деформации h_ϵ от усилия прижатия АВ F

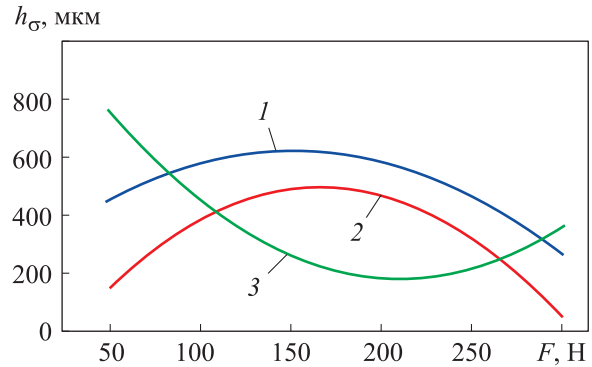


Рис. 7. Зависимость глубины залегания h_σ максимальных тангенциальных (1), осевых (2) и радиальных (3) сжимающих ОН от усилия прижатия АВ F

На четвертом этапе исследования получена зависимость глубины залегания максимальных тангенциальных (1), осевых (2) и радиальных (3) сжимающих ОН от усилия прижатия АВ (рис. 7).

Как видно из рис. 7, глубина залегания максимальных сжимающих ОН находится не на поверхности, а на некоторой глубине, наибольшее значение которой составляет 500...700 мкм. Таким образом, при повышении усилия прижатия АВ с 50 до 190 Н глубина залегания максимальных сжимающих ОН увеличивается на 80 %.

Алмазное выглаживание является финишным методом улучшения качества поверхности, характеризующимся небольшой глубиной пластической деформации поверхностного упрочнения (менее 180 мкм), что подтверждено результатами моделирования (см. рис. 6).

В связи с тем, что размер расчетной зоны был максимально уменьшен для снижения времени решения задачи и его точности, с возрастанием подачи при очередном обороте заготовки алмаз доходил до края патрубка, увеличивая деформацию материала на краю, тем самым повышая временные напряжения и, как следствие, остаточные.

Этот эффект имеет место при реальном выглаживании контактного пояса патрубка, когда рабочий инструмент проходит по кромке контактного пояса седла патрубка, а также по краям граней штока. Эффект возрастания напряжений от деформации на краю изделия показал их увеличение до 25 % при тех же режимах обработки.

Проведенные расчетно-аналитические процедуры подтверждают известную информацию о влиянии усилия прижатия рабочего инстру-

мента на уровень ОН, а также о том, что интенсивность ОН будет повышаться при уменьшении подачи, увеличении глубины внедрения алмаза в деталь и отклонении инструмента от осевой линии.

Решение задачи по упрочнению деталей алмазным выглаживанием позволило смоделировать комплексное воздействие различных параметров, оказывающих влияние на формирование значения ОН в поверхностном слое материала арматурных узлов. Также определены рациональные режимы обработки поверхности методом алмазного выглаживания.

Выводы

1. Выявлены наиболее рациональные режимы алмазного выглаживания: подача $S = 7...30$ мкм/об, усилие прижатия $80...150$ Н. Установлено, что для создания максимальных сжимающих ОН требуется усилие прижатие $F = 80...220$ Н. При увеличении усилия более

230 Н интенсивность напряжений превышает предел прочности стали 20Х13, что приводит к разрушению поверхности материала. В связи с этим не следует применять большие усилия прижатия для алмазного выглаживания такой стали.

2. Натяг инструмента при алмазном выглаживании не должен превышать 120 мкм, иначе будет происходить разрушение поверхности детали вследствие перенаклепа, и сжимающие ОН будут снижаться, а растягивающие увеличиваться.

3. Определено, что отклонение АВ на угол $30...45^\circ$ как от направления подачи, так и от направления вращения заготовки благоприятно сказывается на повышении уровня сжимающих ОН в материале заготовки. Расположение рабочего инструмента с отклонением на угол 45° от указанных направлений применяют при реальном алмазном выглаживании конической части штока и седла патрубка, входящих в состав затворного узла ТАВД.

Литература

- [1] Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*, 2018, т. 16, № 3, с. 129–139, doi: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139
- [2] Волков А.Н., Сазонов М.Б., Читринев И.А. Исследование влияния методов ППД на структуру поверхностного слоя и сопротивление усталости. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2012, № 3(34), с. 153–156.
- [3] Николаева Е.П., Машуков А.Н. Оценка остаточных напряжений в наплавках седел клапанов высокого давления. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2017, № 7, с. 26–29.
- [4] Зайдес С.А., Емельянов В.Н. *Влияние поверхностного пластического деформирования на качество валов*. Иркутск, ИРНТУ, 2017. 380 с.
- [5] Зайдес С.А., Кыонг Н.К. Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. *Научные технологии в машиностроении*, 2017, № 3(69), с. 25–30.
- [6] Торбило В.М. Расчет оптимального усилия при алмазном выглаживании. *Станки и инструмент*, 1970, № 2, с. 25–26.
- [7] Николаева Е.П. Применение метода шумов Баркгаузена для контроля упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2013, т. 15, №6 (2), с. 428–431.
- [8] Кузнецов В.П., Смолин И.Ю., Дмитриев А.И., Коновалов Д.А., Макаров А.В., Киряков А.Е., Юровских А.С. Конечно-элементное моделирование наноструктурирующего выглаживания. *Физическая мезомеханика*, 2011, т. 14 (6), с. 87–97.
- [9] Abul'khanov S.R., Goryainov D.S., Skuratov D.L., Shvetcov A.N. Formation of the surface layer in diamond smoothing. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, pp. 147–149, doi: 10.3103/S1068798X15020033
- [10] Lasitsa M.A., Churankin V.G., Derkach V.V. Parameter's Optimization of Surface Plastic Deformation Corrosion-resistant Steel by Computer Simulation. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 22, no. 4, pp. 991–997.

- [11] Севостьянов А.С., Лукьянов А.А., Бобровский И.Н. Моделирование процесса обработки поверхностно-пластическим деформированием. *Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания*, 2014, № 23, с. 149–153.
- [12] Бруяка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. *Инженерный анализ в Ansys Workbench*. Ч. 1, Самара, СамГТУ, 2010. 271 с.
- [13] Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Влияние направления и геометрии рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние при осциллирующем выглаживании цилиндрических деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 8, с. 28–36, doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-28-36
- [14] Chen X., Liu Y. *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press, 2014. 411 p.
- [15] Друянов, Б.А., Непершин Р.И. *Теория технологической пластичности*. Москва, Машиностроение, 1990. 271 с.

References

- [1] Zaydes S.A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 129–139 (in Russ.), doi: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139
- [2] Volkov A.N., Sazonov M.B., Chigrinev I.A. Research of influence of methods SPD on structure surface layer and resistance of fatigue. *Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering*, 2012, no. 3(34), pp. 153–156 (in Russ.).
- [3] Nikolaeva E.P., Mashukov A.N. Evaluation of residual stresses in high-pressure valve seat surfacing. *Chemical and petroleum engineering*, 2017, vol. 129, pp. 459–463, doi: 10.1007/s10556-017-0363-1
- [4] Zaydes S.A., Emel'yanov V.N. *Vliyanie poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya na kachestvo valov* [The effect of surface plastic deformation on shaft quality]. Irkutsk, IRNITU publ., 2017. 380 p.
- [5] Zaydes S.A., Kyong N.K. New technological potentialities of finish-strengthening by surface plastic deformation. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2017, no. 3(69), pp. 25–30 (in Russ.).
- [6] Torbilo V.M. Calculation of the optimum force for diamond smoothing. *Stanki i instrument*, 1970, no. 2, pp. 25–26 (in Russ.).
- [7] Nikolayeva E.P. Application the Barkhausen noises method for control the hardening of details by superficial plastic deformation. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 15, no. 6(2), pp. 428–431 (in Russ.).
- [8] Kuznetsov V.P., Smolin I.Yu., Dmitriyev A.I., Kononov D.A., Makarov A.V., Kiryakov A.E., Yurovskikh A.S. Finite Element Modeling of Nanostructuring Smoothing. *Physical mesomechanics*, 2011, vol. 14 (6), pp. 87–97.
- [9] 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, pp. 147–149, doi: 10.3103/S1068798X15020033
- [10] Lasitsa M.A., Churankin V.G., Derkach V.V. Parameter's Optimization of Surface Plastic Deformation Corrosion-resistant Steel by Computer Simulation. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 22, no. 4, pp. 991–997.
- [11] Sevost'yanov A.S., Luk'yanov A.A., Bobrovskiy I.N. Modeling the processing of surface plastic deformation. *Intellektual'nyy potentsial XXI veka: stupeni poznaninya*, 2014, no. 23, pp. 149–153 (in Russ.).
- [12] Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.E. *Inzhenernyy analiz v Ansys Workbench* [Engineering Analysis at Ansys Workbench]. Pt. 1, Samara, SamSTU publ., 2010. 271 p.
- [13] Zaydes S.A., Nguyen Van Khin'. The Influence of the Direction and Geometry of the Working Tool on the Stress-Strain State of Cylindrical Parts in Oscillating Burnishing. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 8, pp. 28–36 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-28-36

- [14] Chen X., Liu Y. *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press, 2014. 411 p.
- [15] Druyanov, B.A., Nepershin R.I. *Teoriya tekhnologicheskoy plastichnosti* [Theory of Technological Plasticity]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1990. 271 p.

Статья поступила в редакцию 05.03.2020

Информация об авторах

ЗАЙДЕС Семен Азикович — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Машиностроительные технологии и материалы». ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

МАШУКОВ Артем Николаевич — аспирант кафедры «Машиностроительные технологии и материалы». ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: mexovik@inbox.ru).

Information about the authors

ZAYDES Semen Azikovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Mechanical Engineering Technologies and Materials. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

MASHUKOV Artem Nikolaevich — Postgraduate, Mechanical Engineering Technologies and Materials Department. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: mexovik@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Машуков А.Н. Определение остаточного напряженного состояния патрубков высокого давления при алмазном выглаживании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 8, с. 3–11, doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-3-11

Please cite this article in English as:

Zaydes S.A., Mashukov A.N. Determination of the Residual Stress State of High-Pressure Nozzles During Diamond Smoothing. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 8, pp. 3–11, doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-3-11



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие Н.А. Gladkova, A.N. Morozova, Yu.A. Strukova «Механика в общем курсе физики»

В издании компактно изложены все темы первого раздела общего курса физики — механики: кинематика точки и твердого тела, динамика поступательного и вращательного движения, работа и энергия, механические колебания и волны, а также специальная теория относительности. Теоретический материал дополнен примерами с решениями.

Содержание пособия соответствует курсу лекций, читаемому авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических университетов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru