

УДК 621.91.01:621.787.4:621.79

DOI:10.30987/2223-4608-2020-3-24-31

**С.А. Зайдес**, д.т.н.  
**А.Н. Машуков**, аспирант  
(ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,  
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83)  
E-mail: zsa@istu.edu; mexovik@inbox.ru

## **Использование шумов Баркгаузена для определения остаточных напряжений после алмазного выглаживания патрубков высокого давления**

*Приведены результаты определения остаточных напряжений после алмазного выглаживания затворных узлов арматуры высокого давления. В работе использован метод шумов Баркгаузена, позволяющий определить уровень остаточных напряжений на большей глубине по сравнению с рентгеновским методом. Представлена методика определения остаточных напряжений по соотношению магнитоупругий параметр – деформация. Показано преимущество алмазного выглаживания, позволяющего снизить растягивающие остаточные напряжения и увеличить сжимающие на контактной поверхности арматурных узлов.*

**Ключевые слова:** остаточные напряжения; алмазное выглаживание; патрубок высокого давления; деформация; затворный узел; шумы Баркгаузена.

**S.A. Zaides**, Dr. Sc. Tech.,  
**A.N. Mashukov**, Post graduate student  
(FSBEI HE “Irkutsk National Research Technical University”, 83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074)

## **Use of Barkhausen noise for residual stress definition after diamond smoothing of high-pressure branch pipes**

*The results of residual stress definition after a valve unit diamond smoothing of high-pressure fittings are shown. In the paper there is used Barkhausen noise method allowing the definition of the residual stress level at a great depth as compared with the X-ray method. There is presented a procedure for the definition of residual stresses according to a ratio of a magnetoelastic parameter – deformation. The advantage of the diamond smoothing as a method of FSD allowing the decrease of tensile residual stresses and the increase compression stresses on a contact surface of fittings units is shown.*

**Keywords:** residual stresses; diamond smoothing; high-pressure branch pipe; deformation; valve unit; Barkhausen noise.

### **Введение**

Эксплуатация современных трубопроводных систем в сфере химического и нефтегазового производства немислима без использования надежной и отказоустойчивой арматуры. Арматура высокого давления является технически сложным устройством, надежность и герметичность которого закладывается на этапе производства [1]. Производители арматуры постоянно ведут поиск новых пер-

спективных методов упрочнения и улучшения качества уплотнительной поверхности затворных узлов арматуры высокого давления (патрубка и штока), повышающих её износостойкость, и как следствие обеспечивающих ее герметичность в условиях воздействия химически агрессивных сред. Одним из методов, повышающих износостойкость изделий машиностроительного комплекса, является обкатка шариками и роликами [2].

Но данный метод не лишен недостатков.

Применительно к арматуре высокого давления сложно произвести обкатку поверхности малой ширины (контактного пояса седла) ввиду больших размеров инструмента. Материалы, применяемые для изготовления затворных узлов арматуры, обладают высокой твердостью, в связи с чем обкатка шариками не позволяет обеспечить достаточно высокую степень упрочнения, так как материал шариков имеет невысокую твердость.

Обкатка шариками создает меньшие значения остаточных напряжений, чем при использовании метода алмазного выглаживания [2]. Также в связи с высокой интенсивностью проводимого процесса обкатки при высоких скоростях и усилиях прижатия может происходить большой нагрев поверхностного слоя, что в свою очередь приводит к снижению поверхностных остаточных напряжений детали [2].

Существуют и другие известные методы, позволяющие упрочнять арматурные узлы и повышать уровень сжимающих остаточных напряжений на поверхности затворных узлов, такие как: наплавка, дробеструйная обработка, напыление металлопокрытий и др. [3, 4].

Перспективным методом, предложенным для улучшения качества контактных поверхностей патрубка и штока, является технология поверхностного пластического деформирования алмазным выглаживанием [5]. Алмазное выглаживание позволяет повысить качество поверхности патрубков, снизить шероховатость поверхности, уменьшить отклонения от круглости [6]. Основными факторами, влияющими на эффективность алмазного выглаживания, являются усилие прижатия, величины подачи, радиус рабочего инструмента и его форма, угол наклона. При выглаживании в поверхностном слое образуется мелкодисперсная структура с высокой плотностью дислокаций. Интенсивная пластическая деформация поверхностного слоя и изменение его объема в связи с фазовым  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращением способствует возникновению остаточных напряжений сжатия [7].

Существует большое количество методов, позволяющих определять уровень остаточных напряжений в деталях машиностроительного комплекса, прошедших различные процедуры упрочнения. Из неразрушающих известны такие методы, как рентгеновский, лазерной дифрактометрии, вихретоковый [8 – 12]. Основными недостатками наиболее распространенных неразрушающих методов определения остаточных напряжений является их низкая проникающая способность. Например, приме-

няя рентгеновский метод, можно определить остаточные напряжения на поверхности материала и на глубине до нескольких микрометров.

Для определения напряжений разрушающими методами из заготовки необходимо вырезать образцы, по результатам исследования деформации которых можно сделать выводы о величинах остаточных напряжений [13, 14].

Метод определения остаточных напряжений по шумам Баркгаузена обладает преимуществом перед вышеуказанными неразрушающими методами. Он позволяет определять остаточные напряжения на поверхности и на глубине для стали от 0,01 до 3 мм, при этом материал детали не разрушается.

Данный метод успешно применяется для выявления участков обработанной шлифованием поверхности, позволяет выявлять зоны прижогов, имеющие высокий уровень шумов и как – следствие высокий уровень растягивающих напряжений [15]. Метод широко применяется и для определения уровня остаточных напряжений в деталях, подвергнутых поверхностному пластическому деформированию [16]. По результатам анализа было принято решение при измерении остаточных напряжений – отдавать предпочтение данному методу.

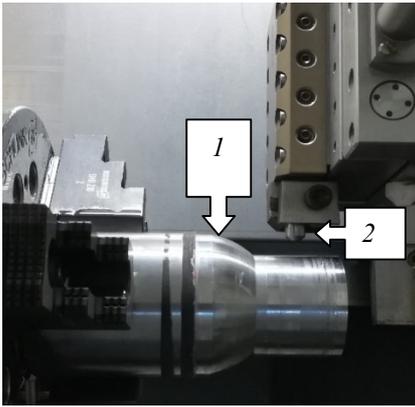
Цель исследования – определить величину остаточных напряжений в затворных узлах арматуры высокого давления после проведения алмазного выглаживания.

### Методика исследования

Для определения остаточных напряжений в контактных поверхностях затворных узлов арматуры высокого давления исследовали серийно изготовленные патрубки арматуры высокого давления DN40: в неупрочненном (исходном) состоянии (после механической обработки токарным резцом), после проведения алмазного выглаживания с оптимальными режимами обработки: подачей  $S = 0,01$  мм/об; частотой вращения заготовки  $n = 80$  об/мин; силой прижатия  $F = 150$  Н (рис. 1).

Для исследования патрубков применяли оборудование НИЛ «Исследования технологических остаточных напряжений и деформаций» ИРННТУ.

Для проведения измерений остаточных напряжений использовали метод, основанный на эффекте Баркгаузена – скачкообразном изменении намагниченности ферромагнетика при непрерывном изменении внешнего магнитного поля.



**Рис. 1. Алмазное выглаживание патрубка высокого давления:**

1 – патрубок высокого давления; 2 – алмазный выглаживатель

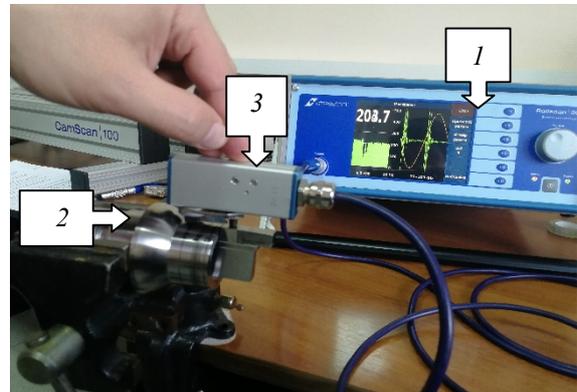
Энергетический спектр шумов Баркгаузена находится в диапазоне частот, начинающемся от частоты внешнего намагничивающего поля и расширяющемся в большинстве материалов до 250...500 кГц. Этот шум экспоненциально затухает в зависимости от расстояния вглубь от поверхности материала. Основными факторами, определяющими глубину, на которой заметен эффект, является электропроводность и магнитная проницаемость испытываемого материала, а также частотный диапазон, выбранный для анализа [12].

Анализ шумов Баркгаузена основывается на относительно простой технологии, заключающейся в особенностях поведения ферромагнитных материалов в магнитном поле. При помещении ферромагнетика в магнитное поле происходит изменение результирующей намагниченности. Это изменение является результатом микроскопических движений стенок магнитных доменов внутри материала. Во время движения доменных стенок в катушке, расположенной рядом с материалом, возникает электрический импульс. Совокупность дискретных сигналов образует шумоподобные электрические импульсы, называемые шумами Баркгаузена, амплитуда шумов Баркгаузена также называется магнитоупругим параметром (МП).

Метод измерения амплитуды шумов (или магнитоупругого параметра) основан на концепции индуктивного измерения амплитуды шумоподобных сигналов, которые генерируются в ферромагнитном образце при приложении магнитного поля. В общем случае шумы возрастают с понижением твердости и с увеличением напряжений растяжения, и, наоборот, снижаются при увеличении напряже-

ний сжатия [15].

Применение метода обусловлено наличием корреляционной связи между амплитудой шумов Баркгаузена (магнитоупругим параметром) и микроструктурой, твердостью, остаточными напряжениями в исследуемых сплавах. Метод является информационно-родственным известным методам магнитной и электромагнитной структуроскопии. В исследовании использовали цифровой анализатор шумов Баркгаузена Rollscan – 300 фирмы Stresstech (Финляндия) (рис. 2). Частоты намагничивания 1,0...1000 Гц; напряжение намагничивания 1,0...16 В; частотные фильтры анализа 10...70, 70...200, 200...450 кГц. Существует возможность измерения напряжений под различными покрытиями.



**Рис. 2. Цифровой анализатор шумов Баркгаузена Rollscan 300:**

1 – информационная панель Rollscan 300;  
2 – измеряемый патрубок клапана высокого давления DN 40;  
3 – датчик цифрового шумоанализатора Rollscan 300

Эксперименты выполнены на образцах из стали 20X13. Данная сталь является сталью ферромагнитного класса, хорошо отражающей значения шумов Баркгаузена при измерении в магнитном поле.

Сталь 20X13 – сталь мартенситного класса и часто применяется для изготовления запорной арматуры, в том числе и высокого давления [17]. Для сравнения количественных значений полученных остаточных напряжений и предела текучести материала предварительно были проведены механические испытания стали 20X13, из которой изготавливались патрубки высокого давления. По результатам испытаний предел текучести стали 20X13 составил  $\sigma_{0,2} = 1202...1210$  МПа.

Для определения соотношения остаточные напряжения – магнитоупругий параметр (ам-

плитуда шумов Баркгаузена) предварительно провели исследования на плоских образцах, выполненных из того же материала с аналогичными механическими свойствами без проведения термообработки.

Плоские образцы служат для определения величины растягивающих и сжимающих напряжений, которые формируются при их изгибе. Для экспериментов использовали два типа образцов, которые отличались размерами. Образцы первого типа имели размеры 2,57×15×160 мм, а образцы второго типа – 3,16×15×90 мм.

Размеры пластин были специально подобраны под размеры базы приспособления, которое использовали для обеспечения необходимой стрелы прогиба и проведения замеров индикатором часового типа. При изгибе пластин вверх для определения сжимающих напряжений использовали пластины большей длины. При изгибе пластин вниз применяли пластины меньшей длины. Пластины были изготовлены из того же сортового проката – круга, что и патрубки.

Для вычисления значения магнитоупругого параметра пластины подвергали деформациям в специальном приспособлении, где осуществлялся изгиб пластин (рис. 3). Образцы первого типа изгибали в вертикальном направлении вверх в центральной части пластин для создания сжимающих напряжений. На образцах второго типа прогиб выполнялся в вертикальном направлении вниз, на поверхности пластины в центральной её части создавались растягивающие напряжения.

Замеры на пластинах проводили в том же направлении, что и на патрубках для обеспечения корректности измерений, в связи с тем, что величина магнитоупругого параметра в материале изменяется в зависимости от ори-

ентации зерен, также, как и в материале исследуемой детали.

После снятия нагрузки часть временных напряжений сохранилась и перешла в остаточные.

На пластинах с полученными по значениям деформации напряжениями провели измерения магнитоупругого параметра.

Калибровку цифрового анализатора шумов Баркгаузена для определения остаточных напряжений производили в следующей последовательности: контрольную пластину – образец первого типа деформировали в центральной области, сводя края пластины навстречу друг другу, создавая сжимающие напряжения в центре пластины; затем образцы второго типа прогибали в обратном направлении, создавая растягивающие напряжения в центре пластины с регистрацией стрелы прогиба индикатором часового типа с двухопорной планкой на базе 64 мм. Нагрузку на образец осуществляли ступенчато с шагом 25 мкМ; по стреле прогиба вычисляли значение радиуса изгиба полоски по которому, с использованием модуля упругости I рода, определяли значение созданного в пластинке напряжения на каждом этапе нагружения, параллельно определяли значения магнитоупругого параметра МП (амплитуды шумов Баркгаузена). Замеры величины стрелы прогиба пластин выполняли при помощи индикатора часового типа. Расчет напряжений проводили по формулам:

$$\sigma = E y \frac{1}{\rho}, \quad \rho = \frac{a^2}{8f}, \quad y = \frac{h}{2} \quad (1)$$

где  $f$  – стрела прогиба пластины, измеряемая на базе  $a$ ;  $E$  – модуль Юнга (для стали 20Х13  $E = 2,18 \cdot 10^5$  МПа);  $\rho$  – кривизна пластины;  $y$  – расстояние от нейтральной линии до рассматриваемого слоя;  $h$  – толщина пластины.

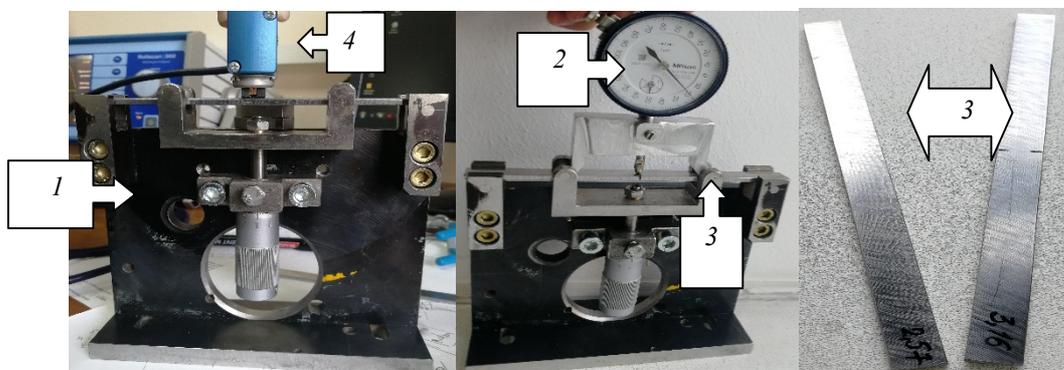


Рис. 3. Приспособление для задания величины прогиба пластин:

1 – станок для изгиба пластины; 2 – индикатор часового типа; 3 – деформируемые пластины из стали 20Х13; 4 – датчик цифрового шумоанализатора Rollscan 300

В результате получили калибровочную зависимость в координатах напряжение – магнитоупругий параметр. По результатам измерений построен график калибровочной зависимости: сформированные напряжения (полу-

ченные по результатам измерения деформаций пластин) – магнитоупругий параметр (см. рис. 4). Напряжения сжимающие указаны со знаком минус, растягивающие – со знаком плюс.

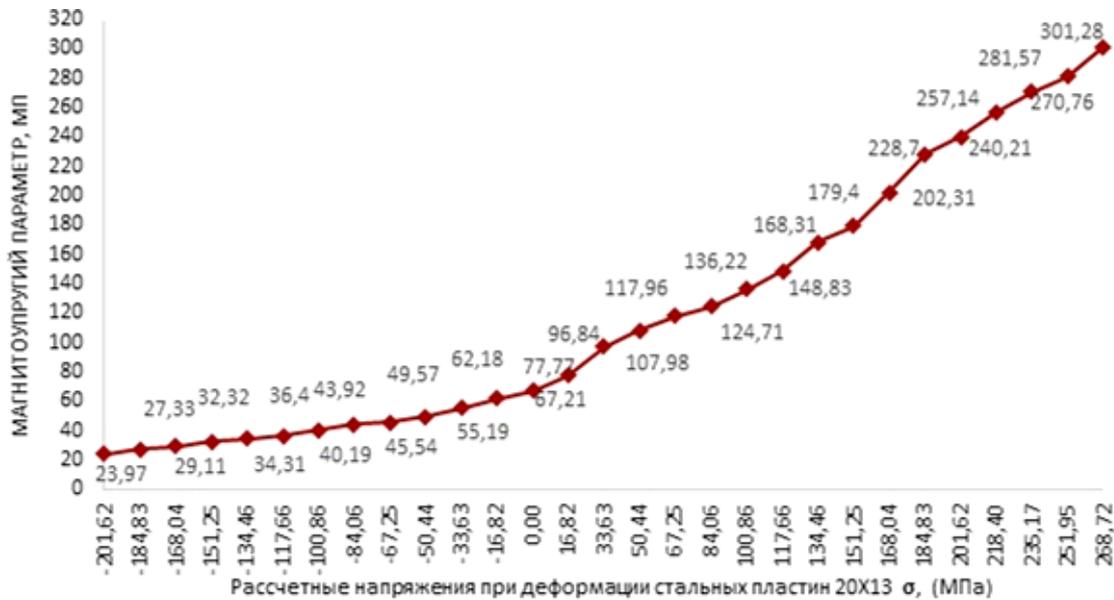


Рис. 4. Изменение магнитоупругого параметра МП в зависимости от остаточных напряжений в пластинах из стали 20Х13

Как видно из графика, представленного на рис. 4, уменьшение значений сжимающих остаточных напряжений и увеличение растягивающих приводит к возрастанию величины шумов Баркгаузена и, наоборот, на участке возрастания значений сжимающих напряжений и снижение величины растягивающих напряжений при замерах магнитоупругого параметра МП показывают снижение шумов.

Интенсивность изменения напряжений, пропорциональная шумам Баркгаузена, различна. Как видно из рис. 4 при низких величинах магнитоупругого параметра величина сжимающих напряжений резко возрастает, увеличиваясь на десятки единиц. Высокие значения магнитоупругого параметра МП свидетельствуют о наличии растягивающих напряжений. Растягивающие напряжения при высоких значениях магнитоупругого параметра изменяются плавно. Величина изменения растягивающих напряжений практически сопоставима с величиной изменения магнитоупругого параметра, что свидетельствует о высокой чувствительности метода.

Полученная калибровочная кривая, представленная на рис. 4, была использована для определения остаточных напряжений в патрубках высокого давления.

### Результаты исследования

Принципиальная схема проведенных измерений магнитоупругого параметра МП патрубка клапана высокого давления приведена на рис. 5.

При проведении тестовых измерений были определены оптимальные параметры измерения: напряжение намагничивания  $U = 3,4$  В; частота намагничивания  $f = 10$  Гц. Данные параметры позволяют определить остаточные напряжения в стали 20Х13 на глубине упрочнения до 0,2 мм.

Поскольку метод алмазного выглаживания является финишным методом обработки поверхности, глубина упрочнения при использовании данного метода невысока, а наиболее высокие остаточные напряжения создаются на поверхности обрабатываемой детали. Использовали частотные настройки Rollscan 300 (частота намагничивания  $f = 10$  Гц), позволяющие наиболее точно определить величину магнитоупругого параметра на глубине до 0,2 мм.

Полученные ранее результаты экспериментальных исследований [6] показывают, что наилучшая шероховатость поверхности получена при подаче 0,01 мм/об, также оптимальными режимами признаны: сила прижатия

150 Н; оптимальная частота вращения заготовки – 80 об/мин. Величина подачи, показывающая худшее значение качества поверхно-

сти – 0,09 мм/об. Приняли решение провести исследование остаточных напряжений по данным режимам.

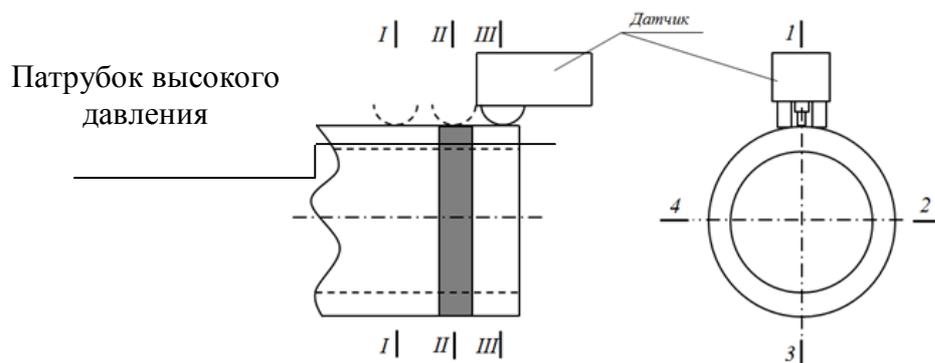


Рис. 5. Схема измерения шумов Баркгаузена в патрубках высокого давления

Образец имеет следующие зоны (рис. 5.): сечение I-I – неупрочненная зона; сечение II-II – зона, упрочненная алмазным выглаживанием по 2 режиму (подача 0,09 мм/об); сечение III-III – зона, упрочненная алмазным выглаживанием по 1 режиму (подача 0,01 мм/об). Цвет поверхности в пределах зоны сечения II-II темно-серый.

Измерения проводили в трех параллельных друг другу сечениях (I-I, II-II, III-III) в 4-х контрольных точках (КТ) (1, 2, 3, 4), расположенных диаметрально противоположно под

углом 90°. В каждой контрольной точке проводили три статических измерения длительностью 3 с, за результат принимали среднее арифметическое значение трех измерений [18, 19].

Результаты измерений магнитоупругого параметра и соответствующие им величины остаточных напряжений приведены в табл. 1. В связи с тем, что размеры датчика не позволяют установить его на криволинейной поверхности, замеры проводили вдоль образца.

1. Значения магнитоупругого параметра шумов Баркгаузена МП и остаточных напряжений

Среднее арифметическое значение параметров в контрольных точках 1,2,3,4	Зоны измерений Шумов Баркгаузена					
	I-I (неупрочненная)		II-II (выглажен с подачи 0,09 мм/об)		III-III (выглажен с подачи 0,01 мм/об)	
	Шумы (МП)	Напряжения $\sigma$ (МПа)	Шумы (МП)	Напряжения $\sigma$ (МПа)	Шумы (МП)	Напряжения $\sigma$ (МПа)
	258,49	+226	45,95	-87	39,11	-108,5

Как видно из табл. 1, на поверхности неупрочненного патрубка высокого давления преобладают растягивающие напряжения со средней величиной 226 МПа. После проведения алмазного выглаживания напряжения поменяли знак с растягивающих на сжимающие, при этом создавая упрочнение поверхности арматурных узлов высокого давления. Существующие методы финишной обработки поверхности, такие как полирование, не создают высоких величин сжимающих остаточных напряжений, а обработка поверхности шлифованием снижает ее прочность и износостойкость, создавая растягивающие напряжения [20]. Метод финишной обработки поверхности – алмазное выглаживание, выгодно отли-

чается от известных методов, повышая уровень сжимающих остаточных напряжений на поверхности деталей, что подтверждается данными исследованиями.

Таким образом установлено что, при алмазном выглаживании величина остаточных напряжений при упрочнении с подачей 0,09 мм/об, силой прижатия выглаживателя 150 Н и частотой вращения заготовки 80 об/мин изменилась с растягивающих +226 МПа до сжимающих -87 МПа.

При упрочнении с подачей 0,01 мм/об и прочих тех же режимах обработки величина остаточных напряжений изменилась, с +226 МПа (растягивающие) до -108,5 МПа (сжимающие) что благоприятно сказывается

на повышении прочности и износостойкости контактных поверхностей затворных узлов арматуры и подтверждает благоприятное влияние малых величин подачи при упрочнении и улучшении качества поверхности затворных узлов арматуры высокого давления.

Данным исследованием установлено, что алмазное выглаживание снижает уровень растягивающих остаточных напряжений и повышает уровень сжимающих остаточных напряжений в затворных узлах арматуры высокого давления. Проведенные исследования подтверждают преимущества используемой технологии алмазного выглаживания при упрочнении затворных пар арматурных узлов перед другими технологиями поверхностного пластического деформирования, такими как обкатка шариками или роликами.

### Выводы

1. Результаты проведенных исследований показали высокий уровень сжимающих остаточных напряжений, полученных в результате применения технологии алмазного выглаживания. Исследования остаточных напряжений на поверхности арматурных узлов высокого давления после алмазного выглаживания показывают изменение растягивающих напряжений до напряжений сжатия, в среднем изменившись на 335 МПа. Значения сжимающих остаточных напряжений в затворных узлах арматуры высокого давления повысились на 109 МПа, что составляет 9 % от предела текучести материала затворных узлов (1202 МПа), и свидетельствует об увеличении прочности, износостойкости затворных узлов арматуры.

2. По результатам экспериментальных исследований получена корреляционная зависимость магнитоупругого параметра от остаточных напряжений для стали 20Х13.

3. Исследование подтвердило оптимальность ранее выбранного режима подачи (0,01 мм/об) выглаживателя для создания максимально высокого уровня сжимающих напряжений на уплотнительной поверхности затворного узла арматуры высокого давления.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Погодин, В. К.** Запорные клапаны на высокие параметры эксплуатации. Исследования и проектирование. – Братск: Издательство Братского государственного университета, 2016. – 363 с.

2. **Климова, Л. Г.** Формирование технологических остаточных напряжений при поверхностном пластическом

деформировании / Л.Г. Климова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – Иркутск: Изд-во ФГБОУ ВО ИРНИТУ, 2011. – № 5(52). – С.42-46.

3. **Николаева, Е.П.** Оценка остаточных напряжений в наплавках седел клапанов высокого давления / Е.П. Николаева, А.Н. Машуков // Химическое и нефтегазовое машиностроение – М. – 2017. – №7 – С.26-29.

4. **Николаева, Е.П.** Применение рентгеноструктурного анализа и шумов Баркгаузена для исследования конструкционной стали 30ХГСА после дробеударной обработки / Е.П. Николаева, Е.В. Гридасова, В.В. Герасимов // Известия Самарского научного центра академии наук. 2015. – Т.17, №2 – С.125-132.

5. **Зайдес, С.А.** Влияние скоростных режимов процесса алмазного выглаживания на улучшение качества поверхности затворных узлов арматуры высокого давления / С.А. Зайдес, А.Н. Машуков // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): Материалы IX-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: 24-26 апреля 2019. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. – С.81-88.

6. **Зайдес, С.А.** Применение технологии алмазного выглаживания для улучшения микрогеометрии затворных узлов арматуры высокого давления / С.А. Зайдес, А.Н. Машуков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово: Изд-во ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева». – 2019. – №1. – С.5-13.

7. **Папшева, Н.Д.** Влияние алмазного выглаживания на работоспособность режущего инструмента / Н.Д. Папшева, О.М. Акушская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. – Т.18. – № 4(2). – С.357-361.

8. **Бабенко, М.Г.** Измерение остаточных напряжений в материале технических объектов методом зондирующего отверстия / М.Г. Бабенко, С.В. Слесарев, А.И. Бабенко // Вестник СГТУ. – Саратов, 2011. – № 2(56). – С.21-23.

9. **Ultrasonic** evaluation of welding residual stresses in stainless steel pressure vessel / A. Joseph, P. Palanichamy, T. Jayakumar // Journal of Nondestructive Evaluation, 2015, Volume 34, Number 1, Page 1.

10. **Measuring** multiple residual-stress components using the contour method and multiple / Cut P. Pagliaro, M. B. Prime // Experimental Mechanics February 2010, Volume 50, Issue 2, pp. 187–194.

11. **Evaluation** of residual stresses relaxation by post weld heat treatment using contour method and x-ray diffraction method / P. Xie1, H. Zhao1, B. Wu2, S. Gong // Experimental Mechanics. – 2015. – 55. – pp. 1329–1337.

12. **Никитина, Е. Н.** Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин / Н.Е. Никитина, С.В. Казачек // Вестник научно-технического развития. – 2010. – №4(32). – С. 18-28.

13. **Овсенко, Е.С.** Методы определения технологических остаточных напряжений в деталях малой жесткости /

Е.С. Овсенко, А.Н. Овсенко, Е.Г. Ягуткин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М., 2011. – №4-6. – С. 29-32.

14. Зайдес, С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. – 311 с.

15. Суоминен, Л. Обнаружение дефектов шлифования деталей из ферромагнитных материалов с использованием эффекта Баркгаузена // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – №2(52). – С.74-78.

16. 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.

17. Савельев, В.А. Влияние технологии обработки на структуру и свойства запорной арматуры из стали 20Х13 / В.А. Савельев, Т.П. Сорогина // Вестник КГУ. – 2010. – №1. – С.106-107.

18. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.

19. ГОСТ Р 55044-2012. Техническая диагностика. Порядок выбора объектов.

20. Карманов, В.В. Опыт применения роботизированного комплекса XSTRESS для измерения технологических остаточных напряжений / В.В. Карманов, В.Н. Трофимов, А.С. Нуртдинов, Звонов С.Н. // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2015. – №1. – С.56-59.

## REFERENCES

1. Pogodin, V.K. *Clacks for High Parameters of Operation. Investigations and Design*. Publishing House of Bratsk State University. Bratsk, 2016. – pp. 363.

2. Klimova, L.G., Formation of technological residual stresses at surface plastic deformation / L.G. Klimova / *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. – Publishing House of FSBEI HE IRNITU, Irkutsk, 2011. No.5(52) – pp. 42-46.

3. Nikolaeva, E.P. Estimate of residual stresses in weld depositions of high-pressure valve seats / E.P. Nikolaeva, A.N. Mashukov / *Chemical and Oil-Gas Engineering*. – М., – No.7 2017. – pp. 26-29.

4. Nikolaeva, E.P., Application of X-ray structure analysis and Barkhausen noise for investigation of structural steel 30HGSA after shot blasting / E.P. Nikolaeva, E.V. Gridasova, V.V. Gerasimov / *Proceedings of Samara Scientific Center of Sciences* / Samara, Vol.17, No.2, 2015, pp. 125-132.

5. Zaides S.A., Speed mode impact of diamond smoothing upon surface quality improvement of valve units of high-pressure fittings / S.A. Zaides, A.N. Mashukov / *Structural material life (from manufacturing up to utilization) – Proceedings of the IX-th All-Russian Scientif.-Tech. Conf. with Inter. Participation*. – IRNITU Publishers, Irkutsk, April 24-26, 2019. – pp. 81-88.

6. Zaides S.A., Application of diamond smoothing technology for micro-geometry improvement of valve units of high-

pressure fittings / S.A. Zaides, A.N. Mashukov / *Bulletin of Kuzbass State Technical University*. – Publishing House of FSBEI HE “Gorbachyov State Technical University of Kuzbass”. – Kemerovo, 2019. – No.1. – pp. 5-13.

7. Papsheva N.D., Diamond smoothing impact upon cutter working capacity / N.D. Papsheva, O.M. Akushskaya / *Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, Vol.18, No.4(2), 2016. pp. 357-361.

8. Babenko M.G., Measurement of residual stresses in material of engineering objects through method of probing hole / M.G. Babenko, S.V. Slesarev, A.I. Babenko / *Saratov, Bulletin of SSTU*. 2011. No.2(56). Issue 2. – pp. 21-23.

9. Ultrasonic evaluation of welding residual stresses in stainless steel pressure vessel / A. Joseph, P. Palanichamy, T. Jayakumar // *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2015, Volume 34, Number 1, p. 1.

10. Measuring multiple residual-stress components using the contour method and multiple / Cut P. Pagliaro, M. B. Prime // *Experimental Mechanics*. – February 2010, Volume 50, Issue 2, pp. 187–194.

11. Evaluation of residual stresses relaxation by post weld heat treatment using contour method and x-ray diffraction method / P. Xie1, H. Zhao1, B. Wu2, S. Gong // *Experimental Mechanics*. – 2015. – 55. – pp. 1329–1337.

12. Nikitina, E.N., Advantages of acoustic elasticity method for nondestructive check of mechanical stresses in machinery / N.E. Nikitina, S.V. Kazachek // *Bulletin of Scientific Technical Development*. – М., – 2010. – № 4(32). – pp. 18-28.

13. Ovseenko, E.S., Methods for definition of technological residual stresses in low-rigidity parts / E.S. Ovseenko, A.N. Ovseenko, E.G. Yagutkin / *Mining Information-Analytical Bulletin (Scientific-Technical Journal)*. – М., 2011. – №.S4-6. – pp. 29-32.

14. Zaides, S.A. *External Surface Plastic Deformation*. – Irkutsk: IrSTU Publishers, 2001. –311 p.

15. Suominen, L., Flaw location in ferromagnetic parts during grinding using Barkhausen effect // *In the World of Nondestructive Check*. – June 2011. – № 2(52). – pp. 74-78.

16. Nikolaeva, E.P. Use of Barkhausen noise method for parts strengthening control by surface plastic deformation // *Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, Vol. 15, No.6(2), 2013. – pp. 428-431.

17. Saveliev, V.A., Processing technology impact upon structure and properties of close fitting valve of steel 20H13 // V.A. Saveliev, T.P. Sorogina // *Bulletin of KSU*. – 2010. – №1. – pp. 106-107.

18. GOST R 56542-2015. *Nondestructive Check. Classification of Kinds and Methods*.

19. GOST R 55044-2012. *Technical Diagnostics. Order of Object Choice*.

20. Karmanov V.V., Experience of XSTRESS robotized complex application for measurement of technological residual stresses / V.V. Karmanov, V.N. Trofimov, A.S. Nurtdinov, S.N. Zvonov // *Bulletin of Nosov STU of Moscow*. – 2015. – №1. – pp. 56-59.

Рецензент д.т.н. В.Ю. Блюментейн