



## ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ РАБОЧЕГО ПОЯСКА СЕДЕЛ КРИОГЕННЫХ ЗАТВОРОВ

✉<sup>1</sup> Албагачиев Али Юсупович

доктор технических наук,  
заведующий отделом ИМАШ  
РАН им. А.А. Благонравова,  
г. Москва, Россия,  
e-mail: Albagachiev@yandex.ru

### Аннотация.

Предложен способ и технология ударной обработки рабочего пояска седел криогенных затворов, проведены экспериментальные исследования качества (шероховатости и микротвердости). Разработана модель расчета температуры и остаточных напряжений при упрочнении ударом.

**Ключевые слова:** СЕДЛО, ОБРАБОТКА УДАРОМ, ШЕРОХОВАТОСТЬ, МИКРОТВЕРДОСТЬ, ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРА, НАКЛЕП.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## INVESTIGATION OF THE QUALITY OF IMPACT TREATMENT OF THE WORKING BELT OF CRYOGENIC GATE SEATS

✉<sup>1</sup> Albagachiev Ali Yusupovich

doctor of technical sciences, mechanical engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences them.  
A.A. Blagonravova, Moscow, Russia  
e-mail: Albagachiev@yandex.ru

### Annotation.

A method and technology for impact processing of the working belt of cryogenic valve seats is proposed, experimental studies of quality (roughness and microhardness) are carried out. A model for calculating temperature and residual stresses during impact hardening has been developed.

**Keywords:** SEAT, IMPACT TREATMENT, ROUGHNESS, MICROHARDNESS, RESIDUAL STRESSES, TEMPERATURE, HARDENING.

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Работоспособность и эксплуатационные характеристики, а именно, герметичность и ресурс работы пары седло-клапан криогенных затворов (рис. 1) в значительной мере определяются состоянием поверхности и качеством поверхностного слоя (шероховатостью, микротвердостью, остаточными напряжениями, поглощенной энергией), формируемого как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации при температурах от плюс 50 до  $-253^{\circ}\text{C}$ .

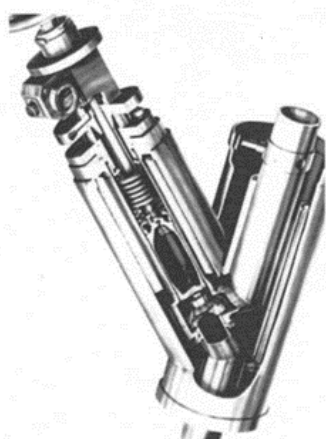
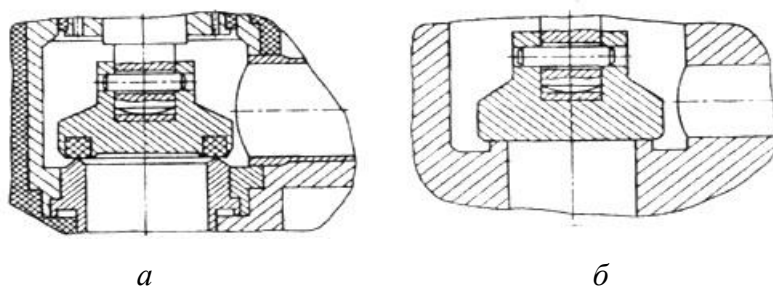


Рисунок 1 – Криогенный затвор

Конструктивные элементы поясков седел криогенной арматуры приведены на рисунке 2. С целью достижения наилучших характеристик качества – шероховатости поверхности, геометрической формы и перпендикулярности рабочего торца уплотняющего элемента к оси направляющего цилиндра, почти все типы седел, эксплуатирующихся в широком диапазоне плюсовых и минусовых температур и воздействия агрессивных сред, подвергаются обработке шлифованием с последующей, малопроизводительной притиркой.

Условия эксплуатации при криогенной темпера-



*a* – пара с фасонным уплотнительным элементом; *б* – пара с плоским уплотнительным элементом

Рисунок 2 – Конструктивные схемы пар седло-клапан криогенных затворов

туре ограничивают и делают непригодными использование высокопрочных материалов и покрытий для изготовления седел. Как правило, для этого в основном используют нержавеющей и коррозионностойкие стали. Прогрессивным методом, позволяющим повысить эффективность обработки поверхностей деталей, является метод ударной обработки [1-14]. Однако данный метод применительно к парам седло-клапан, работающим в условиях низких температур, не исследован [1, 2].

## 2 Материалы и методы

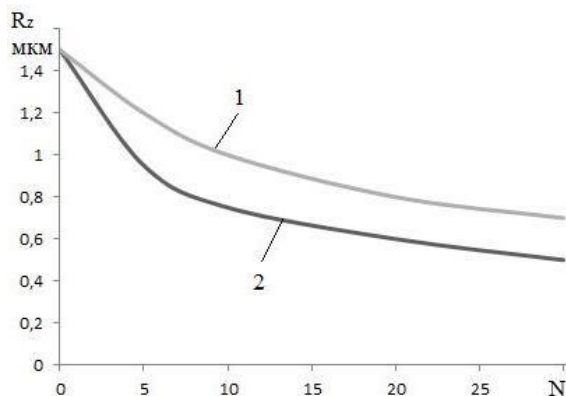
В данной работе предлагается технологический метод формирования профиля седла и его одновременного упрочнения многократными ударами. Метод реализуется с помощью ударной установки и инструментов с плоским и фасонным рабочим профилем. На модельных образцах и натуральных седлах с помощью устройств и приборов проводились измерения: времени удара и температуры; шероховатости и микротвердости; фаз микроструктуры и геометрических отклонений.

В результате экспериментальных исследований, проведенных на модельных образцах и натуральных деталях ( $D_{y20}$ ), изготовленных из стали 12X18H10T, установлено, что радиус пояска уплотнительного элемента формируется полностью после третьего удара бойком, изготовленным из стали ШХ-15 и копирующим профиль седла. При этом повышение его качества (шероховатость и микротвердость) обеспечивается только после многократных ударов.

## 3 Результаты исследования

### 3.1 Экспериментальные результаты

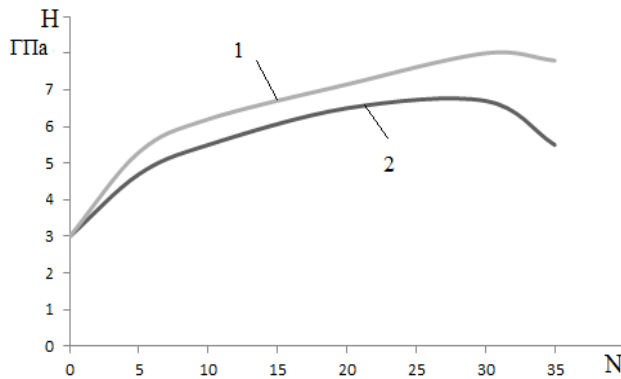
После нанесения 30 ударов шероховатость поверхности снизилась с  $R_z$  1,5 (исходная, после точения) до  $R_z$  0,5 ... 0,8 мкм (рис. 3), микротвердость возрасла от  $H$  322 кг/мм<sup>2</sup> (исходная) до 690 ... 800 кг/мм<sup>2</sup> при энергии удара  $W = 14$  Дж, а глубина упрочненного слоя составила 0,95 мм.



1 – при температуре  $-196$  °C; 2 – при температуре  $20$  °C

Рисунок 3 – Зависимость шероховатости  $R_z$  от количества ударов  $N$  при энергии удара  $W = 14$  Дж

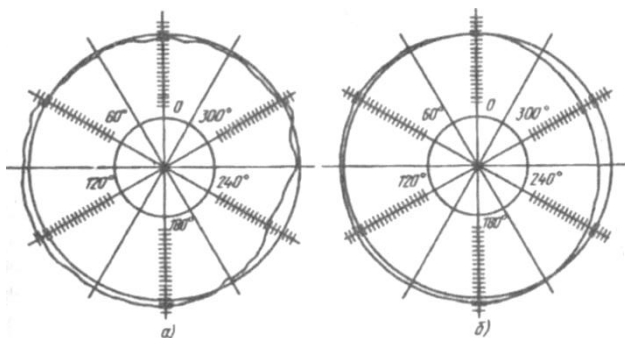
В деформируемом объеме стали происходят фазовые превращения по типу  $\gamma \rightarrow \alpha$ . С количеством ударов возрастает доля  $\alpha$  – фазы и после 30 удара наступает период насыщения (55 %). Дальнейшее увеличение числа ударов приводит к увеличению шероховатости и снижению микротвердости, т.е. к ухудшению качества (рис. 4). Это связано с появлением перенаклепа у деформируемого поверхностного слоя, что ухудшает качество и такие режимы недопустимы.



1 – при температуре  $-196^{\circ}\text{C}$ ;  
2 – при температуре  $20^{\circ}\text{C}$

Рисунок 4 — Зависимость микротвердости  $H$  от количества ударов  $N$  при энергии удара  $W=14$  Дж

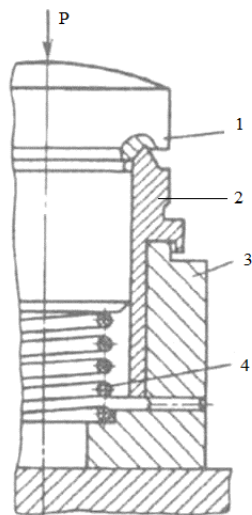
Круглограммы, снятые с седел после их ударного упрочнения на приборе «Галерунд» (рис. 5), показали, что суммарная погрешность не превышает 11 мкм, а погрешность седел, изготовленных по заводской технологии, составила 43 мкм.



а – до ударной обработки;  
б – после ударной обработки

Рисунок 5 — Волнограммы поверхности седла

Проведенные испытания позволили предложить новый технологический процесс для изготовления ряда седел Ду10 ... Ду50, в котором при изготовлении седел с плоским и фасонным уплотнительным элементом вместо операций шлифования и притирки введена операция ударной обработки. Технологический процесс, рекомендации по выбору режимов ударной обработки, исключая перенаклеп, установка и устройство (рис. 6) внедрены в промышленность.



1 – ударник, 2 – седло, 3 – опорный корпус, 4 – пружина

Рисунок 6 — Устройство для ударной обработки седел

Сравнительные эксплуатационные испытания на стенде для выявления герметичности показали, что у седел, изготовленных по предложенному технологическому процессу, ресурс работоспособности увеличился по сравнению с седлами, изготовленными по традиционной технологии, в 1,5-2 раза и в 1,5 раза снизилось время изготовления (табл. 1).

3.2 Аналитическое моделирование ударной обработки

Динамическая модель ударно-импульсной обработки седел включает систему расчетных формул суммарных остаточных напряжений, температуры, поглощенной энергии, глубины пластически деформированного слоя [3-6].

В результате удара рабочая поверхность подвергается силовому воздействию, быстрому нагреву и охлаждению, в ней протекают структурно-фазовые превращения (аустенитно-мартенситные превращения), возникает наклеп. Все это приводит к формированию остаточных напряжений разных знаков. Предлагаемая математическая модель для оценки остаточных напряжений, формирующихся в поверхностном слое деталей машин, учитывает механико-температурное воздействие и протекающие в результате этого структурно-фазовые превращения [12, 15].

Таблица 1 — Технологические переходы изготовления седел клапанов криогенных затворов

Переходы по базовой технологии седла		Переходы по разработанной технологии	
1	Токарная	1	Токарная
1.1	Заготовительная	1.1	Заготовительная
1.2	Установка заготовки в кулачки	1.2	Установка заготовки в кулачки
1.3	Подрезка торца	1.3	Подрезка торца
1.4	Сверление отверстия $\varnothing 10^{+0,2}$	1.4	Сверление отверстия $\varnothing 10^{+0,2}$
1.5	Обточка $\varnothing 34^{-0,052}$	1.5	Обточка $\varnothing 34^{-0,052}$
1.6	Обточка и подрезка торца	1.6	Обточка и подрезка торца
1.7	Точение канавки	1.7	Точение канавки
1.8	Приточка кулачков	1.8	Приточка кулачков
1.9	Установка заготовки кулачков	1.9	Установка заготовки кулачков
1.10	Подрезка торца	1.10	Подрезка торца
1.11	Обточка $\varnothing 26,85_{-0,26}$ под резьбу M27 $\times 1,5-8$ и подрезка торца	1.11	Обточка $\varnothing 26,85_{-0,26}$ под резьбу M27 $\times 1,5-8$ и подрезка торца
1.12	Точение канавки	1.12	Точение канавки
1.13	Точение уплотнительного элемента	1.13	Точение фаски
1.14	Точение фаски	1.14	Нарезание резьбы M27 $\times 1,5-8$
1.15	Нарезание резьбы M27 $\times 1,5-8$	2	Формирование радиусного профиля и упрочнение ударом
2	Притирочная		
Суммарное время обработки $T_{\text{ш}} = 50,38$ мин		Суммарное время обработки $T_{\text{ш}} = 34,34$ мин	

Суммарные остаточные напряжения рассчитывались по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{сум}} = -\sigma_{\text{сил}} + \sigma_{\text{тем}} \pm \sigma_{\text{ф}} \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{сил}}$  – механические остаточные напряжения;  $\sigma_{\text{тем}}$  – температурные напряжения;  $\sigma_{\text{ф}}$  – остаточные напряжения от структурно-фазовых превращений.

Силовые остаточные напряжения оценивались по формуле:

$$\sigma_{\text{сил}} = \sigma_{\text{T}}(1 - z/H), \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{T}}$  – предел текучести;  $H$  – глубина пластической деформации;  $z$  – координата по глубине.

Остаточные напряжения структурно-фазовых превращений определялась исходя из полученных результатов эксперимента. Пластическая деформация при ударной обработке неодно-

родна и она локализуется в отдельных микрообъемах по следам скольжения (сдвига). Результаты контроля фаз, полученные нами с помощью фазометра ФА-1, показали, что при ударе в стали 12Х18Н10Т происходит превращение аустенита ( $\gamma$ -фаза) в мартенсит ( $\alpha$ -фаза). Поскольку плотность мартенсита меньше плотности аустенита, то при фазовом превращении аустенита в мартенсит возникают остаточные напряжения сжатия, определяемые по формуле:

$$\sigma_{\Phi} = \frac{E_2}{3} \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right), \quad (3)$$

где  $E_2$  – модуль упругости материала заготовки;  $\rho_1, \rho_2$  – плотности фаз до фазовых превращений и после. Если плотность фазы до фазовых превращений меньше, чем после них, то в этом случае возникают остаточные напряжения растяжения, и в формулу (1) они подставляются со знаком (+), в противном случае подставляются со знаком (–). Плотность различных структурных составляющих сталей имеет следующие значения, кг/м<sup>3</sup>: перлит – 7800; троостит – 7808 ... 7830; мартенсит – 7760; аустенит – 8150; феррит – 7900; цементит – 7700.

### 3.3 Остаточные температурные напряжения

В процессе удара, в результате сжатия при нагружении и растяжения при разгрузке в обрабатываемом поверхностном слое происходит упругопластическая деформация, которая приводит к повышению температуры и увеличению объема деформированного слоя. Этому препятствуют лежащие ниже слои. В результате нагрева в наружном слое возникают температурные напряжения сжатия, а во внутренних слоях – уравнивающие их напряжения растяжения. После охлаждения картина меняется, и в поверхностном слое остаточные напряжения имеют знак плюс, а по глубине располагаются напряжения сжатия со знаком минус. Повышение температуры до 200<sup>0</sup>С вызывает напряжения, превышающие предел текучести, стали. Температурные остаточные растягивающие напряжения, возникшие в результате нагрева и охлаждения и протекающие при ударе в поверхностном деформированном слое, можно рассчитать по следующей формуле:

$$\sigma_T = \alpha E \Theta / (1 - \nu), \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $\Theta$  – температура;  $E$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Для расчета остаточных напряжений в формулу (4) необходимо подставить значения температуры. Однако температура, в свою очередь, зависит от изменения мощности удара, физико-механических свойств материалов и т.д. Решением дифференциального уравнения теплопроводности методом преобразования Лапласа

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (5)$$

с начальным  $\theta = 0$  при  $t = 0$  и граничными условиями:

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{PV \left( \frac{t}{\Delta t} + \frac{t^2}{\Delta t^2} \right)}{A}, \quad (6)$$

$$\theta = 0 \text{ при } z \rightarrow \infty,$$

получена формула для расчета температуры по глубине и времени удара при параболическом изменении прикладываемой мощности импульсных процессов обработки по времени:

$$\Theta(z, t) = \frac{(1 - \alpha_T) PV}{A \lambda \Delta t \sqrt{\pi}} \left\{ \left( 1 - \frac{t}{\Delta t} \right) t \left[ 2 \sqrt{at} \exp \left( -\frac{z^2}{4at} \right) - \sqrt{\pi z} \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2 \sqrt{at}} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $P$  – сила удара,  $V$  – скорость,  $\alpha_T$  – коэффициент распределения тепловых потоков,  $a$  – температуропроводность,  $\lambda$  – теплопроводность,  $z$ ,  $t$  – соответственно текущие координаты расстояния от поверхности и времени,  $A$  – площадь контакта,  $\Delta t$  – продолжительность удара,  $erfc$  – функция ошибок.

По формуле (7) выполняется расчет температуры поверхности контакта и объемной температуры при ударе в любой момент времени. Для расчета средней контактной температуры поверхности в формуле (7) примем  $z = 0$ , тогда получим:

$$\Theta(0,t) = \frac{4(1-\alpha_{mn})PV\sqrt{at}}{3\sqrt{\pi}A\lambda} \left(1 - 0.8 \frac{t}{\Delta t}\right) \frac{t}{\Delta t}. \quad (8)$$

Если отбросить вследствие малости все члены ряда (7) кроме первого, то имеем

$$\Theta(z,t) = \frac{(1-\alpha_T)PV}{A\lambda\Delta t\sqrt{\pi}} \left\{ \left(1 - \frac{t}{\Delta t}\right) t \left[ 2\sqrt{at} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) \right] \right\}. \quad (9)$$

В процессе поверхностного упругопластического деформирования при ударной обработке поглощается энергия, упругая часть которой после разгрузки контакта релаксирует. Поглощенную энергию можно определить через напряжения и деформации, протекающие в пластической области. Примем вид диаграммы упругопластического деформирования, приведенный на рисунке 7.

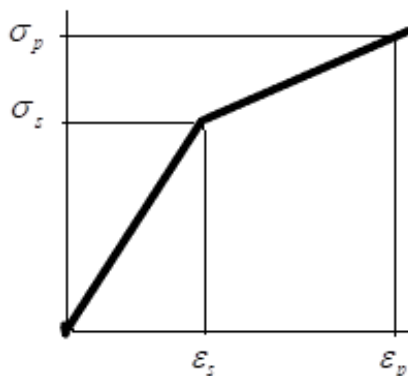


Рисунок 7 – Диаграмма деформирования металла при ударе

Из приведенной диаграммы можно определить объемную удельную энергоемкость:

$$W_v = 0.5 [ (\sigma_p - \sigma_s)(\varepsilon_p - \varepsilon_s) ]. \quad (10)$$

Количество циклов до наступления перенаклепа при ударной обработке определится выражением:

$$n = \frac{W_v A}{Nt} = \frac{0.5A [ (\sigma_p - \sigma_s)(\varepsilon_p - \varepsilon_s) ]}{PV(t / \Delta t - t^2 / \Delta t^2)t}, \quad (11)$$

где  $\sigma_p$ ,  $\sigma_s$  – соответственно пределы разрушения и упругости;  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_s$  – соответственно деформация разрушения и упругая деформация;  $N$  – мощность удара;  $t$  – время;  $A$  – площадь контакта.

По формуле (11) при заданных значениях количества циклов, силы, площади контакта и времени можно рассчитать скорость обработки.

Глубина (наклепа) пластической деформации при ударной обработке выражается через время и скорость ее распространения.

$$H = \sqrt{\frac{D}{\rho}} t, \quad (12)$$

где  $D$  – модуль пластичности;  $\rho$  – плотность;  $t$  – время контакта при ударе.

#### 4 Обсуждение и заключение

Разработаны модели и предложена технология, в которой переходы точения уплотнительного элемента седел и притирка заменены на ударную обработку бойком, копирующим конечный профиль седла, что позволило повысить качество седел и их долговечность в 2 раза, а также увеличить производительность и снизить штучное время на выполнение операции в 1,5 раза. При этом установлено, что степень упрочнения нержавеющей стали 12Н18Н10Т при низкотемпературной ударной обработке ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) выше, чем при обработке в условиях нормальной температуры, а шероховатость  $R_z$  при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  значительно ниже, чем при низкотемпературном упрочнении. Предложены аналитические модели расчета остаточных напряжений, температуры, энергоемкости, глубины наклепа.

#### Список литературы

- 1 Албагачиев А. Ю., Зуев В. В. Эффективные технологические методы обеспечения качества деталей машин. М.: МГУПИ. 2013. – 123 с.
- 2 Перспективные методы поверхностной обработки деталей машин / Отв. ред. Г. В. Москвитин. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 448 с.
- 3 Научные основы материаловедения: Учебн. для вузов / Б. Н. Пастухова. М.: Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 336 с.
- 4 Кошелев, О. С. Упрочнение материала при динамическом внедрении клинового индентора. Кошелев О. С., Костылев А. В., Мишакин В. В. Цой Г. М. // Известия АМН РФ. – 2001. – Юб. Том – С. 126-135.
- 5 Мишакин, В. В. Использование метода ударного внедрения индентора для оценки параметров упрочнения листовых металлов // Вторая научно-техническая конференция посвященная 15-летию Нф ИМАШ РАН: Тез. докл. Н. Новгород, 2001. – С. 65.
- 6 Мишакин, В. В. Определение механических характеристик тонколистового металла ударным внедрением индентора / Мишакин В. В., Борисов А. А., Литовченко В. Н. и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2000. – № 12. – С. 32-34.
- 7 Бабичев, А. П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко, И. А. Бабичев. ДГТУ: Ростов н/Д, 2003. – 192 с.
- 8 Баринов, С. В. Повышение сопротивления контактному выкрашиванию гетерогенным деформационным упрочнением статикоимпульсной обработкой: дис. . канд. техн. наук: 05.02.08, 05.03.01 / Баринов Сергей Владимирович. – Орел, 2009. – 166 с.
- 9 Лебедев, В. А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования / В. А. Лебедев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 183 с.
- 10 Попова, В. В. Поверхностное пластическое деформирование и физикохимическая обработка – М.: Машиностроение, 2013. – 99 с.
- 11 Бобровский, Н. М. Разработка научных основ процесса обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. – Тольятти: Тольяттинский гос. университет, 2008. – 170 с.
- 12 Попелюх, А. И. Повышение конструктивной прочности деталей ударных машин термической обработкой созданием в стали смешанной структуры / А. И. Попелюх, А. М. Теплых, Д. С. Терентьев, А. Ю. Огнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2009. – № 2. – С. 19-24.
- 13 Попелюх, А. И. Пути повышения конструктивной прочности ударного инструмента / А. И. Попелюх, А. М. Теплых, Д. С. Терентьев, А. Ю. Огнев // Обработка металлов. – 2009. – № 4. – С. 15-16.
- 14 Алексенцева, С. Е. Повышение эффективности обработки материалов потоком высокоскоростных дискретных частиц / С. Е. Алексенцева // Вестник СамГТУ Серия Технические науки. – 2015. – № 2(46). – С. 142-145.

15 Андрияшина, Ю. С. Автоматизированный расчет технологических параметров дробеударного формообразования крупногабаритных панелей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. – № 6 (2). – С. 305-308.

### References

- 1 Albagachiev A. Yu., Zuev V. V. Effective technological methods for ensuring the quality of machine parts. Moscow : MGUPI. 2013. – 123 s
- 2 Perspective methods of surface treatment of machine parts / Ed. ed. G. V. Moskvitin. – M. : LENAND, 2019. – 448 s.
- 3 Scientific foundations of materials science : Textbook for universities / B. N. Pastukhov. M. : Publishing house of MVTU im. N. E. Bauman, 2009. – 336 p.
- 4 Koshelev, O. S. Hardening of the material during the dynamic introduction of the wedge indenter. Koshelev O. S., Kostylev A. V., Mishakin V. V. Tsoi G. M. // Izvestiya AMN Rf. – 2001. – Yub. Volume – S. 126-135.
- 5 Mishakin, V. V. Using the method of impact penetration of an indenter to assess the parameters of hardening of sheet metals. report N. Novgorod, 2001. – S. 65.
- 6 Mishakin, V. V. Determination of the mechanical characteristics of thin sheet metal by impact penetration of an indenter / Mishakin V. V., Borisov A. A., Litovchenko V. N. et al. // Forging and stamping production. Metal forming. – 2000. – № 12 – S. 32-34.
- 7 Babichev, A. P. Finishing and hardening processing of parts with a multi-contact vibro-impact tool / A. P. Babichev, P. D. Motrenko, I. A. Babichev. DSTU. : Rostov n / D, 2003. – 192 p.
- 8 Barinov, C. B. Increasing the resistance to contact chipping by heterogeneous strain hardening by static-pulse processing : Cand. . cand. tech. Sciences : 05.02.08, 05.03.01 / Barinov Sergey Vladimirovich. – Eagle, 2009. – 166 p.
- 9 Lebedev, V. A. Technology of dynamic methods of surface plastic deformation / V. A. Lebedev. – Rostov n / a : DSTU Publishing Center, 2006. – 183 p.
- 10 Popova, V. V. Surface plastic deformation and physicochemical treatment – M. : Mashinostroenie, 2013. – 99 p.
- 11 Bobrovsky, N. M. Development of scientific foundations for the process of processing parts by surface plastic deformation without the use of lubricating fluids. – Togliatti : Togliatti State. university, 2008. – 170 p.
- 12 Popelyukh, A. I. Improving the structural strength of shock machine parts by heat treatment by creating a mixed structure in steel / A. I. Popelyukh, A. M. Teplykh, D. S. Terentiev, A. Yu. Ognev // Processing of metals (technology, equipment, tools). – 2009. – № 2 – P. 19-24.
- 13 Popelyukh, A. I., Teplykh, A. M., Terent'ev, D. S., and Ognev, A. Yu., Ways to improve the structural strength of impact tools, Metal Processing. – 2009. – № 4. – P. 15-16.
- 14 Aleksentseva, S. E. Improving the efficiency of material processing by a stream of high-speed discrete particles / S. E. Aleksentseva // Bulletin of SamSTU Series "Technical Sciences". – 2015. – № 2(46). – С. 142-145.
- 15 Andryashina, Yu. S. Automated calculation of technological parameters of shot-impact shaping of large-sized panels // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013. – № 6 (2). – S. 305-308.

© Албагачиев А.Ю., 2022