



Научная статья  
УДК 621.7:004.942

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-184-196>

## Технологическое обеспечение цифрового производства при обработке деталей шарико-стержневым упрочнителем

Михаил Аркадьевич Тамаркин<sup>1✉</sup>, Элина Эдуардовна Тищенко<sup>2</sup>,  
Роман Геннадьевич Тищенко<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup>[tehn\\_rostov@mail.ru](mailto:tehn_rostov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9558-8625>

<sup>2</sup>[lina\\_tishenko@mail.ru](mailto:lina_tishenko@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5156-5544>

<sup>3</sup>[tishenkoroma@icloud.com](mailto:tishenkoroma@icloud.com), <https://orcid.org/0000-001-5495-8749>

**Резюме.** Цель – разработка модуля автоматизированной системы проектирования технологических процессов обработки многоконтактным виброударным инструментом – шарико-стержневым упрочнителем. Объектом исследования явился технологический процесс обработки шарико-стержневым упрочнителем. В качестве критериев оценки эффективности использовались производительность и себестоимость процесса обработки, выраженная в длительности и стоимости достижения заданных параметров упрочнения. В качестве ограничительных функций использовались геометрические и физико-механические параметры поверхностного слоя обрабатываемых деталей, заданные конструктором. Остаточные напряжения в исследуемых образцах определялись по методу Давиденкова. При автоматизации проектирования технологических процессов использовалась среда разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio на языке программирования C#. В результате проведенных исследований установлено, что на формирование качества поверхностного слоя деталей оказывают влияние основные технологические параметры (энергия удара индентора, количество стержней и радиус их заточки, натяг при обработке). На основе проведенных теоретических исследований процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем получены адекватные теоретические модели формирования различных параметров качества поверхностного слоя обработанных деталей и времени обработки. Полученная зависимость прошла комплексную экспериментальную проверку в условиях ПАО «Роствертол» (г. Ростов-на-Дону). Измерения остаточных напряжений в поверхностном слое обработанных ШСУ деталей производились на автоматизированном стенде АСКОН-3-КИ производства Казанского авиационного института. В результате сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований рассматриваемого процесса обработки установлено, что расхождение не превышает 15%. Адекватность теоретических формул осуществлялась по критерию Фишера. На основании результатов исследований разработаны алгоритм и методика проектирования рациональных параметров технологических процессов обработки деталей сложной конфигурации шарико-стержневым упрочнителем. Использование разработанного программного модуля системы автоматизированного проектирования технологических процессов позволило значительно сократить сроки технологической подготовки производства и обеспечить стабильное качество обрабатываемых деталей. Это делает возможным проводить технологическую подготовку в условиях цифрового производства и обеспечить значительное увеличение жизненного цикла выпускаемой продукции.

**Ключевые слова:** автоматизированное проектирование технологического процесса, шероховатость поверхностного слоя, глубина упрочненного слоя, степень деформации, остаточные напряжения, время обработки

**Для цитирования:** Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Тищенко Р. Г. Технологическое обеспечение цифрового производства при обработке деталей шарико-стержневым упрочнителем // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 184–196. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-184-196>.

## Technological support of digital production when processing parts using a ball-rod hardener

Mikhail A. Tamarkin<sup>1✉</sup>, Elina E. Tishchenko<sup>2</sup>, Roman G. Tishchenko<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup>tehn\_rostov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9558-8625>

<sup>2</sup>lina\_tishchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5156-5544>

<sup>3</sup>tishchenkoroma@icloud.com, <https://orcid.org/0000-001-5495-8749>

**Abstract.** In this work, a module of an automated design system for machining using a multi-contact vibrating impact tool, namely a ball-rod hardener, was developed. The technological process of machining using such a hardener was studied. The performance and production cost of machining expressed as the duration and cost of achieving the specified hardening parameters were used to assess the efficiency. The specified geometric, physical and mechanical parameters of the surface layer of processed parts were used as restrictive functions. Residual stresses in samples were determined by Davydenko's method. The Microsoft Visual Studio software and the C# programming language were used to automate process design. The studies established that the quality of the surface layer of parts is influenced by the main technological parameters (the impact energy of the indenter, the number of rods and grinding radius and tension in processing). The adequate theoretical models of developing various quality parameters of the surface layer of machined parts and processing time were obtained from the theoretical studies of the machining process using a ball-rod hardener. The obtained dependence was subjected to a comprehensive verification under the operating conditions at PJSC "Rostvertol" (Rostov-on-Don). Residual stresses in the surface layer of the BRH machined parts were measured using the ASCON-3-KI automated test stand produced by the Kazan Aviation Institute. The discrepancy between the theoretical and experimental results of the machining process was less than 15%. The adequacy of the theoretical formulas was assessed by Fisher's criterion. Based on the research findings, an algorithm and method of designing rational parameters for machining parts of complex geometry using a ball-rod hardener were developed. Using this software for the automated design of technological processes allowed the time of manufacturing preparation to be reduced and the stable quality of machined parts to be ensured. This offers manufacturing preparation in a digital production environment and ensures a significant increase in the useful life of manufactured products.

**Keywords:** computer-aided design of the technological process, surface layer roughness, hardened layer depth, deformation degree, residual stresses, processing time

**For citation:** Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Tishchenko R. G. Technological support of digital production when processing parts using a ball-rod hardener. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):184-196. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-184-196>.

### ВВЕДЕНИЕ

Шарико-стержневой упрочнитель (ШСУ) является новым устройством, предназначенным для обработки поверхности деталей поверхностно-пластическим деформированием. Универсальное приспособление позволяет производить обработку не только плоских поверхностей, но и фасонных, обладающих небольшими перепадами высот. Приспособление изобретено на кафедре «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета под руководством профессора А. П. Бабичева [1]. Технологические возможности устройства сочетают преимущества вибрационной обработки (обработка гибкой гранулированной средой) и значительные усилия соударения, харак-

терные для чеканки и дробеструйной обработки [2–24]. Однако следует отметить, что в связи с недостаточной полнотой теоретического описания процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем затруднена возможность автоматизированного проектирования и оптимизации технологических процессов с использованием рассматриваемого метода обработки.

Целью настоящих исследований является разработка модуля автоматизированной системы проектирования технологических процессов обработки шарико-стержневым упрочнителем для внедрения цифрового производства при финишной обработке деталей сложного профиля поверхностно-пластическим деформированием на основе

результатов многолетних теоретических и экспериментальных исследований процесса.

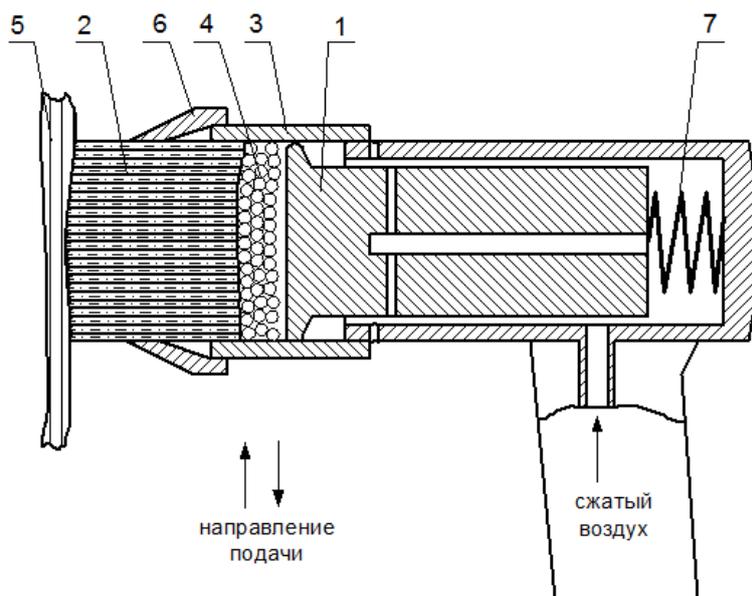
### **Описание конструкции устройства.**

ШСУ содержит оригинальную часть в виде пакета стержней инденторов, имеющих форму цилиндра, с одной стороны которого расположена полусфера определенного радиуса, а второй плоский конец соприкасается с совокупностью металлических шариков, заключенных в ограниченном объеме рабочего цилиндра. Рабочий цилиндр соединяется с корпусом стандартного пневмомолотка, обычно используемого при осуществлении заклепочных соединений (рис. 1). Ударник пневмомолотка осуществляет периодическое воздействие высокой частоты по совокупности металлических шариков. Ударно-волновые импульсы передаются шариками на стержни индентора, которые удерживаются в рабочем цилиндре специальным цанговым зажимом. При надавливании устройства на фасонную поверхность обрабатываемой детали цанга разжимается, и пакет инденторов принимает форму этой поверхности (в случае незначительного перепада высот).

Устройство ШСУ подводится к поверхности детали, и за счет упругого элемента осу-

ществляется натяг при обработке. Благодаря этому ШСУ может использоваться для создания нового профиля микронеровностей, имеющих большую величину радиусов выступов (характерную для обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД)) и упрочнения поверхностного слоя детали, что позволяет значительно повысить ее эксплуатационные свойства.

При разработке конструкции ШСУ решалась задача создать эффективное мобильное устройство для упрочнения участков поверхности деталей, являющихся наиболее опасными при циклическом нагружении, либо участков мест крепления деталей при всесторонней обработке методами ППД, которые невозможно обработать традиционными методами. Малые габариты и мобильность разработанного устройства позволяют использовать его при обработке вручную либо в качестве приспособления, крепящегося к суппорту токарного станка, либо к шпинделю универсально-фрезерного станка, что позволяет создавать заданную величину натяга при обработке и осуществлять регулирование скорости подачи.



**Рис. 1. Схема многоконтактного виброударного инструмента шарико-стержневого упрочнителя:**  
1 – силовой привод с ударником, 2 – пакет круглых стержней, 3 – рабочий цилиндр,  
4 – стальные шары, 5 – обрабатываемая деталь, 6 – цанговый зажим, 7 – упругий элемент  
**Fig. 1. Diagram of a multi-contact vibro-impact tool of a ball-rod hardener:** 1 – a power drive with a striker,  
2 – a package of round rods, 3 – a power cylinder, 4 – steel balls, 5 – a treated workpiece,  
6 – a collet clamp, 7 – an elastic element

Для проектирования технологических процессов обработки ШСУ необходимо получить адекватные модели формирования параметров качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей [2–8]. Целью проведения исследований является выявление зависимостей, описывающих влияние режимов обработки, и конструктивных параметров устройства на геометрические и физико-механические свойства поверхностного слоя упрочненных деталей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для формирования заданной величины показателей качества поверхности обрабатываемой детали проведены теоретические исследования зависимости этих показателей режимов обработки и конструктивных параметров ШСУ [2–8].

**Результаты теоретических исследований.** При проведении теоретических исследований с использованием результатов известных работ [6–19] получены математические модели для определения

– шероховатости обработанной поверхности

$$R_z = 0,03 \sqrt{\frac{E_y \cdot \eta}{D \cdot N \cdot HB^{1,12}}}; \quad (1)$$

– глубины упрочненного слоя

$$H_s = \sqrt[8]{\frac{\left(\frac{E_y \cdot \eta}{D \cdot N \cdot HB^{1,12}}\right)^3}{D}}; \quad (2)$$

– степени пластической деформации

$$\varepsilon = 1,134 \sqrt{\frac{E_y \cdot \eta}{D^3 \cdot N \cdot HB^{1,12}}}, \quad (3)$$

где  $E_y$  – энергия удара бойка;  $N$  – число стержней в пакете;  $HB$  – твердость обрабатываемого материала по Бринеллю;  $\eta$  – коэффициент полезного действия устройства, зависящий от ряда факторов (натяг при об-

работке, количество слоев шариков и т.п.);  $D$  – диаметр сферической заточки стержня индентора.

Одним из важнейших вопросов при изучении методов обработки ППД являются исследования по изучению процесса формирования остаточных напряжений [20–24]. В одном из основных научных трудов по исследованию ШСУ [20] приведены данные о формировании остаточных напряжений и их изменении по глубине поверхностного слоя. Обработка ШСУ позволяет достигать сжимающих остаточных напряжений значительной величины с распределением по глубине до 0,5 мм. Однако следует отметить, что теоретические зависимости, позволяющие рассчитывать величину этих напряжений, до сих пор не разработаны, что сдерживает применение шарико-стержневого упрочнения для обработки ответственных деталей машин, функционирующих в условиях знакопеременных нагрузок.

Анализ научных трудов по разработке теории динамических методов ППД показал, что вывод зависимости для теоретического расчета внутренних напряжений поверхностного слоя обработанных деталей разработан профессором Ю. Р. Копыловым применительно к вибрационной отделочно-упрочняющей обработке [21]. Распространив аналогичную методику на теоретические исследования обработки ШСУ, авторы предлагают зависимость для расчета формирования остаточных напряжений поверхностного слоя обработанных деталей в следующем виде [3, 4, 6]:

$$\sigma_0 = k_u k_\sigma \left( \frac{E_y}{\left(\frac{Dd}{2(D+d)}\right)^3} \right)^{\frac{1}{5}} \times \left( \frac{1-\nu_d^2}{E_d} + \frac{1-\nu_c^2}{E_c} \right)^{\left(-\frac{4}{5}\right)}, \quad (4)$$

где  $k_u$  – коэффициент, учитывающий особенности формирования остаточных напря-

жений при обработке ШСУ (определяется экспериментально);  $k_\sigma$  – коэффициент, учитывающий способность материала к упрочнению;  $D$  и  $d$  – диаметры, соответственно, заточки стержня и отпечатка на детали;  $\nu_d$  и  $\nu_c$  – коэффициенты Пуассона для детали и стержня;  $E_d$  и  $E_c$  – модули упругости первого рода для детали и стержня.

При технологическом проектировании одной из главных задач является расчет времени обработки. Его величина определяет производительность используемого метода обработки, конструктивные параметры и количество единиц используемого оборудования. Разработана теоретическая модель для определения времени обработки за один проход (опыт применения обработки ШСУ показывает, что в большинстве случаев можно ограничиться однократным проходом устройства по поверхности детали):

$$t = \frac{L_{yc} - L_{nak}}{S} \cdot \frac{B_{yc}}{B_{nak}}, \quad (5)$$

где  $L_{yc}$  – длина обрабатываемого участка;  $L_{nak}$  – размер пакета стержней в направлении подачи;  $S$  – подача;  $B_{yc}$  – ширина обрабатываемого участка;  $B_{nak}$  – размер пакета стержней в направлении, перпендикулярном направлению подачи.

Проведен значительный комплекс экспериментальных исследований.

**Результаты экспериментальных исследований.** Данные экспериментов и их сравнение с результатами теоретических расчетов представлены на рис. 1–3. Теоретические зависимости показаны сплошными кривыми, окружностями и квадратами – средние арифметические величины, полученные при проведении экспериментов. Рассчитаны доверительные интервалы (доверительная вероятность 95%). Проведенная проверка адекватности теоретических зависимостей по критерию Фишера показала положительный результат.

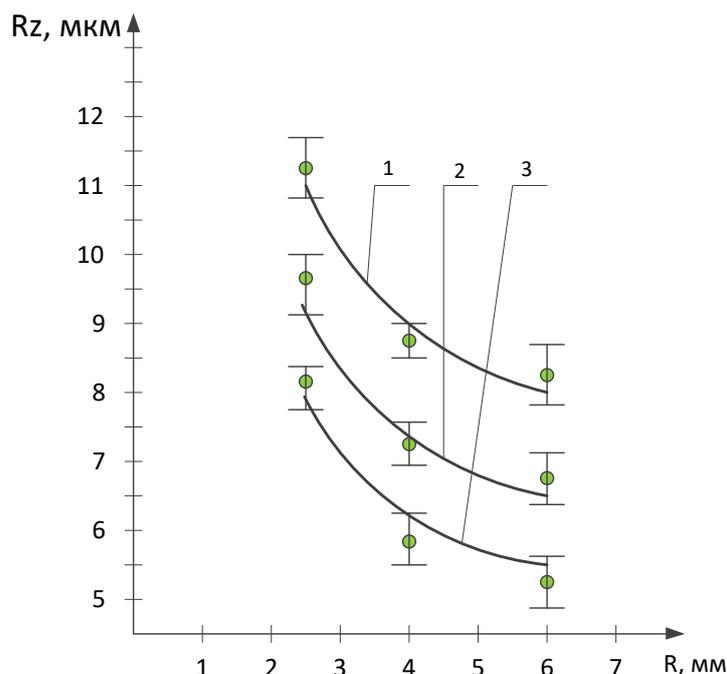


Рис. 2. Влияние радиуса сферической заточки на шероховатость обработанной поверхности ( $N = 19$ ,  $\eta = 0,7$ ):

1 – материал образцов – Д16, 2 – материал образцов – В95, 3 – материал образцов – сталь 45

Fig. 2. Influence of the radius of spherical sharpening on the treated surface roughness ( $N = 19$ ,  $\eta = 0,7$ ): 1 – sample material – Д16, 2 – sample material – В95, 3 – sample material – steel 45

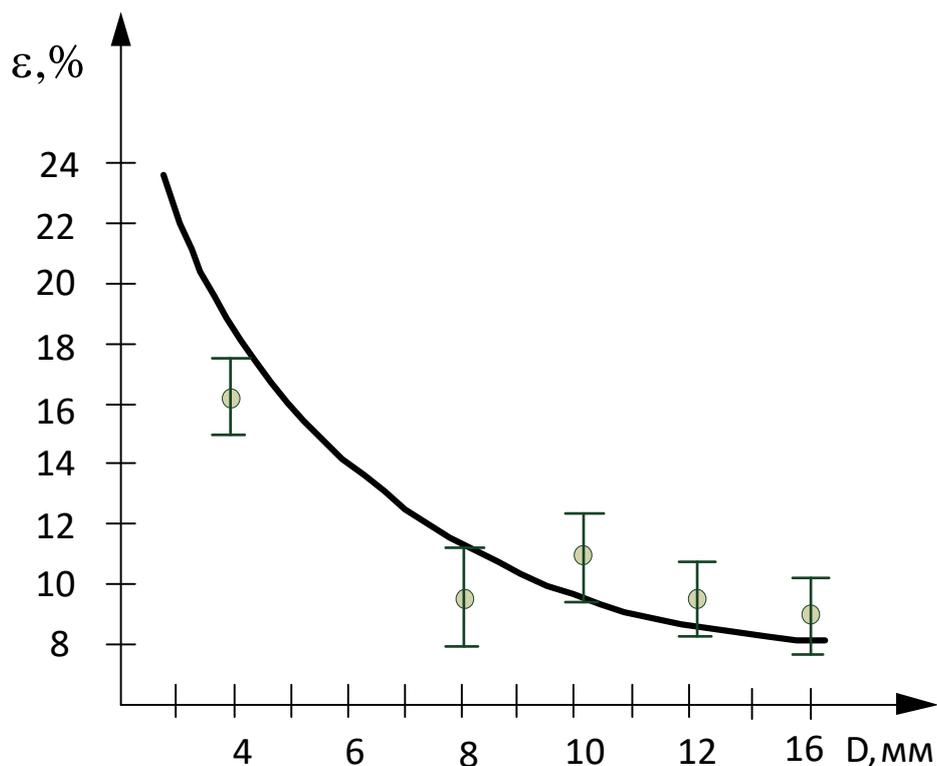


Рис. 3. Влияние диаметра заточки стержня на степень деформации для алюминиевого сплава B95:  
число стержней  $N = 40$ , натяг – 1,5 мм

Fig. 3. Influence of the rod sharpening diameter on the deformation degree of the aluminum alloy B95:  
number of rods  $N = 40$ , interference – 1.5 mm

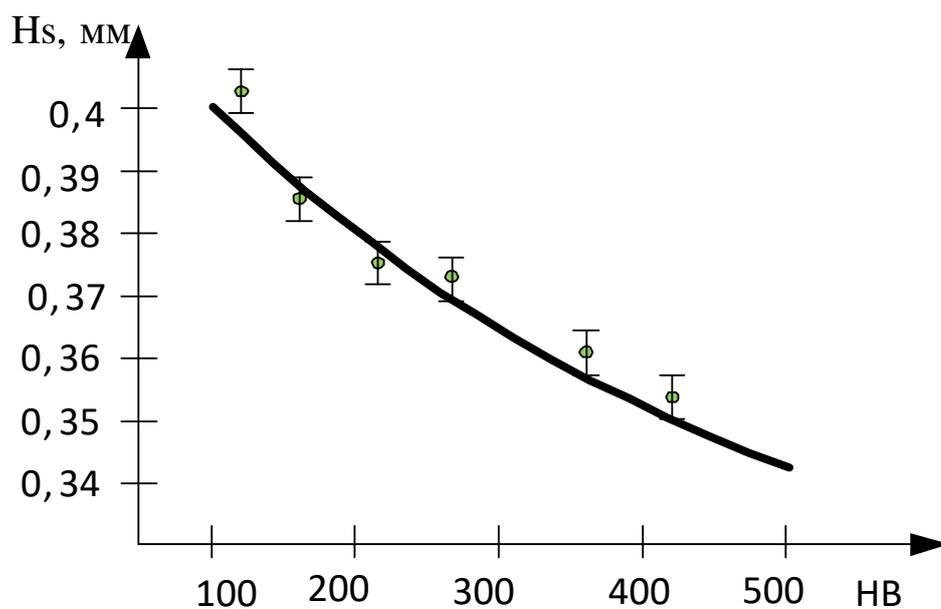


Рис. 4. Влияние твердости по Бринеллю на глубину упрочненного слоя  
(число стержней  $N = 19$ , энергия удара  $E_y = 2,5$  Дж,  $\eta = 0,7$ , диаметр заточки сферы –  $D = 3$  мм)

Fig. 4. Influence of Brinell hardness on the depth of the hardened layer  
(number of rods  $N = 19$ , impact energy  $E_y = 2.5$  J,  $\eta = 0.7$ , sphere sharpening diameter  $D = 3$  mm)

Влияние твердости по Бринеллю на глубину упрочненного слоя рассмотрено на рис. 4.

Полученная зависимость прошла комплексную экспериментальную проверку в условиях ПАО «Роствертол». Измерения остаточных напряжений в поверхностном слое обработанных ШСУ деталей производились на автоматизированном стенде АС-КОН-3-КИ производства Казанского авиационного института. Материал образцов – алюминиевый сплав В96. Образцы в форме прямоугольного параллелепипеда размерами 200×100×20 мм подвергались обработке ШСУ. Пакет стержней с радиусом сферической заточки 4, 8, 12 и 16 мм использовался при осуществлении натяга 1,5 мм и 4,5 мм, затем из обработанных параллелепипедов электроискровым методом вырезались образцы-пластины, на которых остаточные напряжения определялись по методу Давиденкова. Величина сжимающих остаточных напряжений поверхностного слоя достигает 200 МПа, что значительно превышает их величину, полученную при вибрационной отделочно-упрочняющей обработке. Полученные значения сопоставлялись с результатами теоретических расчетов по зависимости (4). Путем деления результатов экспериментальных исследований на результаты теоретических расчетов рассчитывались значения коэффициента  $k_u$ . Как правило, они попадали в промежуток 1,5–1,7. Для дальнейших расчетов рекомендуется значение 1,6.

Результаты сравнения представлены на рис. 5 а и б.

**Проектирование модуля системы автоматизированного проектирования технологических процессов.** Для автоматизированного проектирования технологических процессов обработки ШСУ разработан программный продукт с использованием среды разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio на языке программирования С#, который позволяет по характеристике обрабатываемой детали выбрать средства технологического оснащения, технологические режимы и характеристики рабочей среды при обработке ШСУ. Программа имеет удобный интерфейс (рис. 6) и позволяет в

диалоговом режиме задавать материал, конструктивные особенности обрабатываемой детали, необходимые параметры качества поверхностного слоя, в автоматическом режиме проектировать технологический процесс, выполняя оптимизацию по производительности (времени) обработки (рис. 7).

На основании вышесказанного разработана методика автоматизации и оптимизации технологического проектирования обработки ШСУ:

1. Задаются граничные значения необходимой величины геометрических и физико-механических параметров обработки, соответствующих конструкторским требованиям, размеры и конструктивные особенности обрабатываемой поверхности, а также материал, подвергаемый обработке.

2. Производится выбор пневмомолотка и обрабатывающего устройства (величина пучка стержней, объем шариков и т.п.). Количество стержней в насадке зависит, как правило, от величины обрабатываемого участка при местном упрочнении.

3. Назначаются натяг при обработке, диаметр заточки стержня и диаметр стержня. Повышение твердости обрабатываемого материала вызывает необходимость увеличения натяга и уменьшения диаметров заточки стержней.

4. Включается расчетный блок системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), определяющий величину шероховатости обработанной поверхности, глубину упрочненного слоя, степень деформации, остаточные напряжения по формулам (1)–(4). Расчет параметров качества поверхности позволяет получить множество вариантов технологических процессов. Несоответствующие требованиям конструктора варианты отбрасываются.

5. Для оставшихся вариантов определяется время обработки по зависимости (5). Программа осуществляет поиск вариантов технологических процессов, которые обеспечивают заданные параметры качества поверхностного слоя, и предлагает пользователю варианты, начиная с того, который обеспечивает минимальное время при обработке. Для предложенных вариантов выда-

ются рекомендуемые параметры устройства ШСУ и режимов обработки. Разработка нескольких вариантов позволяет применять в условиях конкретного предприятия уже имеющиеся средства технологического оснащения без дополнительных затрат

на их приобретение.

Планируется внедрение модуля разрабатываемой САПР ТП на ведущих предприятиях машиностроительного профиля. Ведутся переговоры по апробации программного продукта.

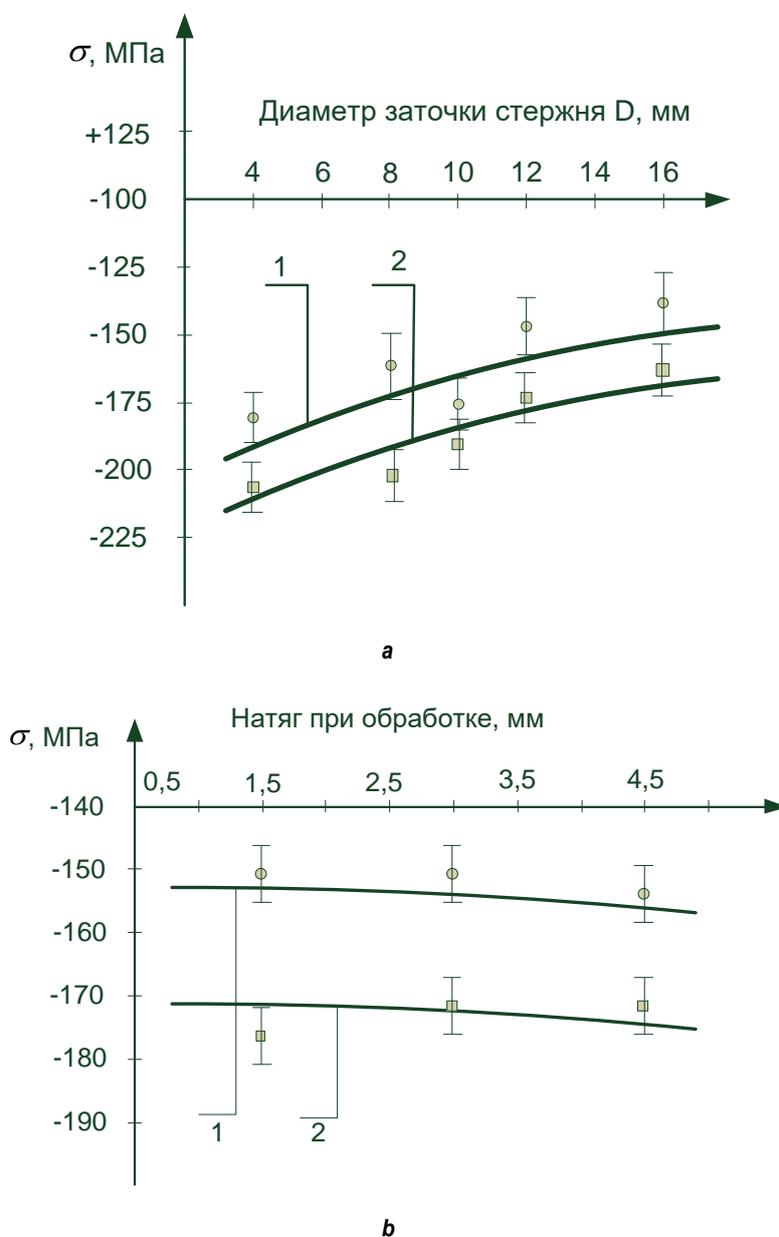


Рис. 5. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований влияния технологических параметров на величину остаточных напряжений при обработке для алюминиевого сплава B95: а – влияние диаметра заточки (натяг – 1,5 мм, число стержней: 1 – N = 19 (●), 2 – N = 40 (■)); б – Влияние натяга при обработке (диаметр заточки стержня D = 16, число стержней: 1 – N = 19 (●), 2 – N = 40 (■))

Fig. 5. Comparison of the results of theoretical and experimental studies of the effect of technological parameters on the amount of residual stresses when processing the aluminum alloy B95: a – influence of the sharpening diameter (interference – 1.5 mm, number of rods: 1 – N = 19 (●), 2 – N = 40 (■)); b – influence of the interference under processing (rod sharpening diameter D = 16, number of rods: 1 – N = 19 (●), 2 – N = 40 (■))



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанные теоретические модели прошли комплексную экспериментальную проверку. Установлено, что различие результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных не превышает 20%. Проверка адекватности осуществлялась по критерию Фишера. Установлено, что полученные зависимости адекватны.

2. Доказано, что при обработке ШСУ формируются остаточные напряжения сжатия, повышается микротвердость поверхностного слоя. Такие параметры поверхностного слоя обеспечивают значительное по-

вышение эксплуатационных свойств ответственных деталей машин, работающих в условиях циклических нагрузок. Величина сжимающих остаточных напряжений достигает 150–200 МПа, что значительно превышает величину остаточных напряжений, полученных при вибрационной обработке.

3. Использование предложенного модуля САПР ТП при технологическом проектировании позволит значительно сократить трудоемкость технологической подготовки производства и повысить эффективность обработки ответственных деталей машин.

## Список источников

1. Пат. № 179570, Российская Федерация, U1, В24В 39/00. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко, Д. Д. Бирюков, Л. О. Лисицкий. № 2017133971. Заявл. 29.09.2017; опубл. 17.05.2018.
2. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E., Melnikov A. Surface quality assurance and process reliability in the processing with a ball-rod hardener // State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2020: 13th International Scientific and Practical Conference. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. P. 05008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505008>.
3. Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Новокрещенов С. А., Морозов С. А. Разработка методики проектирования технологического процесса обработки шарикостержневым упрочнителем с учетом формирования сжимающих остаточных напряжений // Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Vol. 2. № 2. С. 143–149. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-2-143-149>.
4. Tamarkin M., Tishchenko E., Chukarina I., Sosnitskaya T. Parts processing technology for transport engineering // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing / eds. Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich. Cham: Springer, 2020. Vol. 1115. P. 913–922. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_90](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_90).
5. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E. Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery // State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2021: 14th International Scientific and Practical Conference. E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 273. P. 07032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127307032>.
6. Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Исаев А. Г. Обеспечение акустической безопасности при обработке плоских деталей шарикостержневым упрочнителем // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 2. С. 12–19. [https://doi.org/10.12737/article\\_5ac49dc30826b3.63726809](https://doi.org/10.12737/article_5ac49dc30826b3.63726809).
7. Beskopylnyi A., Meskhi B., Beskopylny N., Chukarina I., Isaev A., Veremeenko A. Strengthening of welded joints of load-bearing structures of robotic systems with ball-rod hardening // Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Smart Innovation, Systems and Technologies / eds. M. Shamtsyan, M. Pasetti, A. Beskopylny. Singapore: Springer, 2022. Vol. 247. P. 1–11. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_1).
8. Beskopylny A., Meskhi B., Veremeenko A., Isaev A. Influence of boundary conditions on the strengthening technology of a welded joint with a ball-rod hardener // International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series. 2020. Vol. 1001. P. 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012047>.
9. Lebedev V. A., Chunakhova L. V., Kirichek A. V. Effectiveness of application of additional strengthening processing of surface plastic deformation on increase in fatigue life of parts // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeev, Y. Rozhdestvenskiy. Cham: Springer, 2019. P. 17–25. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_3).
10. Chigirinskii Yu. L. Surface quality after different treatments // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31. Iss. 8. P. 816–819. <https://doi.org/10.3103/S1068798X11080065>.
11. Blumenstein V., Makhalov M. The Metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes // Innovations in Mechanical Engineering: 10th International Scientific and Practical Conference. MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 297. P. 05001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929705001>.
12. Smolentsev V., Safonov S. The technological methods of surface layer modification in construction materials // International Conference on Modern Trends in

Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. P. 01077. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901077>.

13. Makhalov M. S., Blumenstein V. Yu. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration // Solid State Phenomena. 2022. Vol. 328. P. 27–37. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.328.27>.

14. Mahalov M. S., Blumenstein V. Yu. The surface layer mechanical condition and residual stress forming model in surface plastic deformation process with the hardened body effect consideration // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2017. Vol. 253. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012009>.

15. Blumenstein V., Makhalov M. The metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes // Innovations in Mechanical Engineering: 10th International Scientific and Practical Conference. MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 297. P. 05001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929705001>.

16. Mahalov M. S., Blumenstein V. Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes // 7th International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering. Materials Science and Engineering. IOP Conference Series. 2016. Vol. 253. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004>.

17. Plotnikov A. L., Chigirinskii Yu. L., Frolov E. M., Krylov E. G. Formulating CAD/CAM modules for calculating the cutting conditions in machining // Russian Engineering Research. 2009. Vol. 29. No. 5. P. 512–517.

<https://doi.org/10.3103/S1068798X09050207>.

18. Chigirinskii Y. L. Formalized approaches in technological design // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. No. 3. P. 305–307. <https://doi.org/10.3103/S1068798X10030251>.

19. Chigirinskii Yu. L., Firsov I. V., Chigirinskaya N. V. Information system for the design of machining processes // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. No. 1. P. 49–51. <https://doi.org/10.3103/S1068798X14010031>.

20. Тамаркин М. А., Щерба Л. М., Тищенко Э. Э. Проектирование технологических процессов виброударной отделочной обработки шарикостержневым упрочнителем // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 7. С. 13–20.

21. Копылов Ю. Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. 568 с.

22. Кудрявцев И. В. и др. Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклепом. М.: Изд-во НИИ ИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. 144 с.

23. Agapov S. I., Sidyakin Yu. I., Korpelyanskiy O. F. Calculation of roughness parameters during ultrasonic hobbing from the viewpoint of the theory of elastic-plastic contact // Materials Science Forum. 2019. Vol. 973. P. 170–173. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.973.170>.

24. Дрозд М. С. Определение механических свойств металла без разрушения. М.: Изд-во «Металлургия», 1965. 172 с.

## References

1. Babichev A. P., Motrenko P. D., Biryukov D. D., Lisickij L. O. *A device for hardening and finishing treatment*. Patent RF, no. 179570; 2018. (In Russ.).
2. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E., Melnikov A. Surface quality assurance and process reliability in the processing with a ball-rod hardener. In: *State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2020: 13th International Scientific and Practical Conference*. E3S Web of Conferences. 2020;175:05008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505008>.
3. Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Novokreshchenov S. A., Morozov S. A. Development of design methodology of technological process of ball-rod hardening with account for formation of compressive residual stresses. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*. 2020;2(2):143-149. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-143-149>.
4. Tamarkin M., Tishchenko E., Chukarina I., Sosnitskaya T. Parts processing technology for transport engineering. In: Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds.). *8<sup>th</sup> International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer; 2020, vol. 1115, p. 913-922. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_90](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_90).
5. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E. Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery. In: *State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2021: 14th International Scientific and Practical Conference*. E3S Web of Conferences. 2021;273:07032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127307032>.
6. Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Isaev A. G. Acoustic safety support at machining flat parts with ball-rod hardener. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bryansk State Technical University*. 2018;2:12-19. [https://doi.org/10.12737/article\\_5ac49dc30826b3.63726809](https://doi.org/10.12737/article_5ac49dc30826b3.63726809).
7. Beskopylnyi A., Meskhi B., Beskopylny N., Chukarina I., Isaev A., Veremeenko A. Strengthening of welded joints of load-bearing structures of robotic systems with ball-rod hardening In: Shamtsyan M., Pasetti M., Beskopylny A. (eds.). *Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Singapore: Springer; 2022, vol. 247, p. 1-11. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_1).
8. Beskopylny A., Meskhi B., Veremeenko A., Isaev A. Influence of boundary conditions on the strengthening technology of a welded joint with a ball-rod hardener. In: *International Scientific and Practical Conference Environ-*

*mental Risks and Safety in Mechanical Engineering: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series.* 2020;1001:012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012047>.

9. Lebedev V. A., Chunakhova L. V., Kirichek A. V. Effectiveness of application of additional strengthening processing of surface plastic deformation on increase in fatigue life of parts. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds.). *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Cham: Springer; 2019, p. 17-25. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_3).

10. Chigirinskii Yu. L. Surface quality after different treatments. *Russian Engineering Research.* 2011;31(8):816-819. <https://doi.org/10.3103/S1068798X11080065>.

11. Blumenstein V., Makhalov M. The metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes. In: *Innovations in Mechanical Engineering: 10th International Scientific and Practical Conference. MATEC Web of Conferences.* 2019;297:05001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929705001>.

12. Smolentsev V., Safonov S. The technological methods of surface layer modification in construction materials. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences.* 2017;129:01077. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901077>.

13. Makhalov M. S., Blumenstein V. Yu. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration. *Solid State Phenomena.* 2022;328:27-37. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.328.27>.

14. Makhalov M. S., Blumenstein V. Yu. The surface layer mechanical condition and residual stress forming model in surface plastic deformation process with the hardened body effect consideration. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series.* 2017;253:012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012009>.

15. Blumenstein V., Makhalov M. The metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes. In: *Innovations in Mechanical Engineering: 10th International Scientific and Practical Conference. MATEC Web of Conferences.* 2019;297:05001.

<https://doi.org/10.1051/mateconf/201929705001>.

16. Makhalov M. S., Blumenstein V. Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes. In: *7th International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering. Materials Science and Engineering. IOP Conference Series.* 2016;253:012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004>.

17. Plotnikov A. L., Chigirinskii Yu. L., Frolov E. M., Krylov E. G. Formulating CAD/CAM modules for calculating the cutting conditions in machining. *Russian Engineering Research.* 2009;29(5):512-517. <https://doi.org/10.3103/S1068798X09050207>.

18. Chigirinskii Y. L. Formalized approaches in technological design. *Russian Engineering Research.* 2010;30(3):305-307. <https://doi.org/10.3103/S1068798X10030251>.

19. Chigirinskii Yu. L., Firsov I. V., Chigirinskaya N. V. Information system for the design of machining processes. *Russian Engineering Research.* 2014;34(1):49-51. <https://doi.org/10.3103/S1068798X14010031>.

20. Tamarkin M. A., Shcherba L. M., Tishchenko E. E. Designing technological processes of vibro-impact finishing with a ball-rod hardener. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings.* 2005;7:13-20. (In Russ.).

21. Kopylov Yu. R. Dynamics of vibroimpact hardening processes. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2011, 568 p. (In Russ.).

22. Kudryavtsev I. V., et al. Improving hardness and durability of large machine parts by surface work hardening. *Povyshenie prochnosti i dolgovechnosti krupnykh detalej mashin poverhnostnym naklepom.* Moscow: Research Institute of Information on Heavy Power and Transport Engineering; 1970, 144 p. (In Russ.).

23. Agapov S. I., Sidyakin Yu. I., Korpelyanskiy O. F. Calculation of roughness parameters during ultrasonic hobbing from the viewpoint of the theory of elastic-plastic contact. *Materials Science Forum.* 2019;973:170-173. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.973.170>.

24. Drozd M. S. *Non-destructive determination of metal mechanical properties.* Moscow: Metallurgiya; 1965, 172 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Тамаркин Михаил Аркадьевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Технология машиностроения»,  
Донской государственный технический университет,  
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

**Тищенко Элина Эдуардовна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Технология машиностроения»,  
Донской государственный технический университет,  
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Mikhail A. Tamarkin,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Mechanical Engineering  
Technology,  
Don State Technical University,  
1 Gagarin sq., Rostov-on-Don 344000, Russia

**Elina E. Tishchenko,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Mechanical  
Engineering Technology,  
Don State Technical University,  
1 Gagarin sq., Rostov-on-Don 344000, Russia

**Тищенко Роман Геннадьевич,**  
студент,  
Донской государственный технический университет,  
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

**Roman G. Tishchenko,**  
Student,  
Don State Technical University,  
1 Gagarin sq., Rostov-on-Don 344000, Russia

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to the preparation of the article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 03.02.2022; одобрена после рецензирования 06.05.2022; принята к публикации 06.06.2022.

**Information about the article**

The article was submitted 03.02.2022; approved after reviewing 06.05.2022; accepted for publication 06.06.2022.