DOI: 10.34220/2311-8873-2023-3-3-19-33

УДК 621

UDC 621

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА СБОРОК НЕЖЕСТКИХ ОБОЛОЧЕК

PREPARATION OF SURFACES FROM VARIOUS MATERIALS BY COMBINED METHODS TO ENSURE THE QUALITY OF ASSEMBLIES OF NON-RIGID SHELLS

✉[1]**Сухочев Геннадий Алексеевич,**
д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: suhotchev@mail.ru

Подгорнов Сергей Николаевич,
аспирант кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: S.N.Podgornov.vmz@gmail.com

Аннотация. Объектами исследования в данной работе являются технологии подготовки поверхностей нежестких оребренных оболочек оживального профиля для сборки под пайку с исключением на спрягаемых поверхностях дефектов и элементов шаржирования абразивом.

Ключевые слова: КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА, ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ПОД СБОРКУ, ОХЛАЖДАЕМАЯ ОРЕБРЁННАЯ ОБОЛОЧКА.

✉[1]**Sukhochev Gennady Alekseevich,**
Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: suhotchev@mail.ru

Podgornov Sergey Nikolaevich,
Postgraduate student of the Department "Technology of Machine Building", Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: S.N.Podgornov.vmz@gmail.com

Annotation. The objects of research in this work are technologies for preparing surfaces of non-rigid finned shells of the ogival profile for assembly for soldering with the exception of defects and elements of abrasive caricature on conjugated surfaces.

Keywords: COMBINED PROCESSING, TECHNOLOGY OF PREPARATION FOR ASSEMBLY, COOLED FINNED SHELL.

[1] *Автор для ведения переписки*

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Сборки из оребренных нежестких деталей типа оболочек формируют проточные каналы высоконапорных систем теплообмена для экстремально нагруженных силовых агрегатов реактивных двигателей и энергетических установок. Проточные каналы охлаждения по действующей технологии получают в исходно сформованных листовых заготовках по образующей оживальной формы на станках с числовым программным инструментом дисковыми фрезами, спаренными в один блок. Для сборки под пайку высокотемпературном припоем с пониженной текучестью наиболее актуальным и неизученным вопросом является обеспечение гарантированной требуемой формы кромок по выступам ребер и адгезионного состояния поверхностей в зоне сопряжения, что связано с технологически наследованными

параметрами поверхностного слоя при предыдущей обработке. Научно-технологический вопрос состоит в подготовке с требуемыми параметрами торцев выступов оребрения, размеры которых составляют 2-3 мм, чтобы получить наиболее эффективную площадь теплосъёма. Выступы с такими размерами формируют парными фрезами на тонкостенной оболочке оживальной формы на станке с ЧПУ. После этого из-за заусенцев вершины выступов невозможно обработать ни абразивными ни лезвийными методами до требуемого под пайку качества поверхности и провести их надежную активацию [1]. Недостаточно изученным остается вопрос по сохранению острых кромок по вершинам ребер, R не более 0,1 мм. Заусенцы на этих кромках остаются в огромных количествах. Их снимают в составе слесарного участка узловой сборки вручную или абразивом, с последующей индивидуальной ручной доработкой по перепускам систем охлаждения, что является очень трудоемкой дорогостоящей операцией. Длительность снятия заусенцев бывает сопоставима с трудоемкостью всей детали [2]. Авторитетными и известными отечественными научными школами (СГПУ, г. Санкт-Петербург, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, СГТУ, г. Самара, ВГТУ, г. Воронеж и др.) используется как абразивные, так и новые способы активации выступов оболочек с различными физическими явлениями и техническими процессами. Но по-прежнему остаются недостаточно изученными актуальные вопросы теоретического описания механизма образования заданного характера шероховатости различными методами на плоских вершинах оребрения при определенной величине исходной шероховатости и дефектов. В настоящее время решение задач по подготовке поверхностей под пайку нежестких оболочек идет по пути зачистки электродным травлением в химически активных растворах, нанесения различных покрытий с параллельной или последовательной активацией. Решать подобные вопросы предлагается обоснованным включением в комбинированную технологию активирующей электрохимической обработки микрогранулами на завершающем этапе. Работа выполнена в соответствии с научным направлением ВГТУ в соответствии с планом ГБ НИР № 2018.15 «Разработка, исследование и практическое использование нетрадиционных методов и средств проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности аэрокосмической техники нового поколения». Целью работы является получение теоретических основ и научно-обоснованных технологий подготовки поверхности нежесткой оребренной оболочки оживального профиля для сборки под пайку с исключением на спрягаемых поверхностях дефектов и элементов шаржирования абразивом. Задачи:

1. Создать научно-теоретические принципы надежного технологического сопряжения нежесткой оребренной оболочки оживальной формы с поверхностью другой оболочки, полученной методом ротационной вытяжки, и тоже тонкостенной нежесткой деталью через повышенную активацию поверхностей выступов.

2. Установить влияния закономерности абразивных и гальвано-химических режимов обрабатываемости материалов оболочек на гарантированную величину шероховатости и вероятную величину шаржирования сопрягаемых поверхностей.

3. Обосновать физически и математически пределы допустимых границ короблений в нежесткой технологической системе «электрокорунд–микрорельеф-дефектный слой» и отклонений при активации в системе «токопроводящие гранулы–активированный микрорельеф» при электрохимико-механическом воздействии.

4. На основе экспериментальных исследований определить закономерности влияния параметров комбинированных воздействий в процессах предварительной обработки и активации поверхности сложного профиля на ее рабочие показатели.

5. Создать технологическое обеспечение для процессов предварительной обработки и активации поверхности сложного профиля под ее эксплуатационные характеристики, в том числе с комбинированными операциями.

6. Предложить методику выбора режимов технологии подготовки поверхности оболочки оживального профиля без использования свободного абразива в струйной или иной форме, дающей активацию поверхностей вершинам пазов вдоль оживальной формы и обеспечивающей такое повышение энергетического уровня поверхности оболочки, чтобы это дало возможность 10 % повышения эксплуатационных нагрузок на камеры сгорания энергетических установок и двигателей этого класса.

7. Спроектировать технологический процесс подготовки поверхностей нежестких оребренных оболочек оживального профиля для сборки под пайку с исключением на спрягаемых поверхностях дефектов и шаржирования абразивом.

Решение этих задач позволит теоретически и методически обосновать порядок оценки и рационального проблемно-ориентированного повышения производственной технологичности процессов сборки под пайку нежестких оболочек [3].

2 Материалы и методы

Объектами исследования являются технологии подготовки поверхностей нежестких оребренных оболочек оживального профиля для сборки под пайку с исключением на спрягаемых поверхностях дефектов и элементов шаржирования абразивом.

Методы исследования. Исследования теории процессов выполнялись на научных основах технологии машиностроения, технической механики, металлофизики, явлений электрохимического и электролитического травлений, вычислительной математики, математического моделирования. Эксперименты выполнены с помощью современных средств и приборов, по методикам планирования эксперимента и анализа результатов, предложенных автором.

Предметом исследования явились научно-теоретические принципы технологического обеспечения надежного технологического сопряжения нежесткой оребренной оболочки оживального профиля с активированной поверхностью выступов с другой тонкостенной оболочкой, полученной методом ротационной вытяжки.

Достоверность результатов обеспечена корректностью постановки задач, обоснованным использованием аналитических зависимостей, строгостью использованного математического аппарата, корректной постановкой экспериментов, обработки экспериментальных данных и подтверждается качественным и количественным соответствием теоретических исследований с экспериментальными данными, а также практическим применением результатов исследований.

3 Результаты исследований

Из анализа накопленных данных выявлено, что при исследовании рассматриваемого техпроцесса подготовки поверхностей и соединения тонкостенных оболочек необходимо стремиться к снижению абразивного компонента в операциях зачистки оребренных оболочек, предназначенных под активацию. Рисунок 1 представляет одну такую оболочку из бронзы со следами доработки вручную.

Рисунок 1 – Сегмент оребренной рубашки камеры из бронзы

Как видно из рисунка, очевидны следы в пазах от ручной доводки, особенно много их в местах подхода к кольцам завеса, почти в каждом пазу [4]. Технологические требования по выступам заключаются в снятии заусенцев с кромок ребер (рис. 2) без притупления угла (R_{max} = 0,1 мм) под операцию последующей пайки с гладкой оболочкой, формирующей замкнутые каналы.

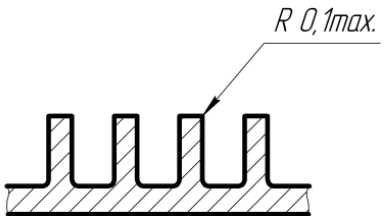


Рисунок 2 – Выступы оребрения рубашки

Главной проблемой в нашем случае является коробление оребренной оболочки с тонким днищем из-за возникающего при дробеструйной обработке наклепа поверхностного слоя. В состав блока камеры в ряде случаев входит оболочка камеры, изготовленная из коррозионностойкой, стали 12Х18Н10Т, а фрезерованная рубашка камеры может изготовлена из жаропрочной стали (рисунок 3). Это еще более усугубляет процессы снятия заусенцев и доводки рубашек под пайку [5].

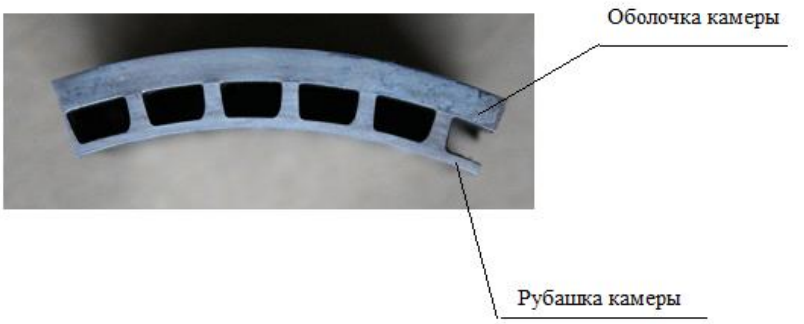


Рисунок 3 – Спаянный образец из жаростойких сталей

Недостатки при снятии заусенцев и формировании кромок приводят к необходимости резко увеличивать температуру пайки и избытого давления. Это приводит к чрезмерному втягиванию наружной оболочки в пазы оребренной (рисунок 4), что нарушает теплоотвод. Страдает качество пайки, бывают отслоения по ребрам.

Рисунок 4 – Узел в сборе после пайки

Для процесса формирования паяного соединения на основе химического реагирования между атомами сопрягаемых тел требуется энергии активации для прорывания энергетического барьера на поверхности [6]. То есть: средняя свободная потенциальная энергия атомов $E_П$ на поверхности выше энергии на глубине h: E_h. Атомы с энергией $E_П$ хаотично сближаются на поверхности с внешними атомами на расстояние физической адсорбции $S_{фа}$, между ними максимум свободной энергии. Далее для сближения их надо стимулировать приближаться на межатомное расстояние. Затем их надо подтолкнуть для взаимного перехода, сообщив энергию активации, которая после перераспределения электронов атомов отдает свою энергию в виде тепла. Для продолжения процесса необходим подогрев: при обычных температурах явление адгезии незначительно. В физически активных центрах с выходом на поверхность и перемещением вакансий (дислокаций), образуются и ускоряются благодаря пластической деформации химические связи. Активация поверхности идет за счет разрушения и схватывания пересыщенных связей. Так и проявляется диффузия на уровне множества атомов. Технологически с учетом этой теории адгезия припоя с поверхностью $A_{\sigma п}$ определяется управляемыми и неуправляемыми параметрами процесса [7]:

$$A_{\sigma п} = f\,(A_{фа},\ E_a,\ t_{ai},\ t_П,\ n(t),\ K_{рм}), \qquad (1)$$

где – $A_{фа}$ расстояние физической адсорбции; E_a – энергия активации в зоне контакта частицы припоя с поверхностью; t_{ai} – период активации при снятии пика межфазной энергии между атомами.

По Больцману

$$t_{ai} = x_0\, e^{\sim Ea\ Aк\ T}\ ; \qquad (2)$$

где x_0 – начальная координата для атома при входе в зону физической адсорбции; $A_к$ – постоянный показатель; T – абсолютная температура; $t_П$ – температура в зоне контакта припоя с поверхностью; $n(t)$ – количество атомов припоя из общего числа $n_{0общ}$, реагировавших за время t_{ai} в зоне контакта частицы с поверхностью; $K_{рм}$ – коэффициент, учитывающий физические свойства припоя (для меди – 1).

Взаимосвязь элементов E_a, $t_П$, $n(t)$, $K_{рм}$ в той или иной мере технологически управляема посредством управления режимами процессов подготовки поверхности и пайки. Параметры $A_{фа}$, x_0 и t_{ai} относятся к понятиям атомного уровня строения вещества и технологически не нормируются. При активации поверхности перед пайкой мы посредством увеличения потенциального количества атомов n(t) за счет последовательной зачистки, травления и анодной комбинированной активации повышаем уровень E_a. То есть, управляем по схеме $n(t)\uparrow\leftrightarrow E_a\uparrow$, следовательно и $A_{\sigma п}$ растет при пайке тонкостенных оболочек. Параметр $K_{рм}$ мы тоже можем варьировать изменяя состав припоя, нанося гальваническим методом различные слои меди, серебра и др., составляя их них разные композиции. Все эти приемы позволят создать активизированную ювенильную поверхность, необходимую для качественной пайки, но она будет носить пятнисто-локальной характер по достигнутым в той или иной точке показателям. Это эффективные параметры процесса, но нужен более технологически управляемый фактор. Известно, что пайка будет достаточно прочной при значении угла смачивания **φ** не более 20° (рис. 5). Технологически это можно обеспечить, подавая в заключительной стадии на оребренную оболочку токопроводящие гранулы соответствующего размера, твердости и формы под нужным углом на определенное время (рис. 6) [8]. Рельеф будет сглажен под нужным углом, обеспечивая наилучшее растекание припоя и удержание его в строго отведенных местах за счет волнистости микрорельефа на выступах оребренной оболочки [9].

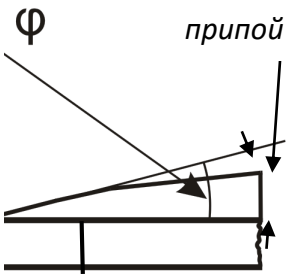


Рисунок 5 – Смоченный припоем участок поверхности

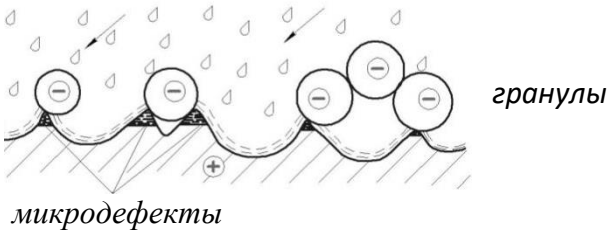


Рисунок 6 – Обдувка токопроводящими гранулами с капельной фракцией в потоке

Этим еще можно добиться и исключения шаржирования, а также устранения микровыступов, препятствующих растеканию припоя. Качественная равномерность возможна и при том, что равно распределённые импульсные ударные контакты сглаживаются воздействием гранул диаметром $D_Г$ вокруг каждой точки обрабатываемой поверхности и дают 100 % покрытие ее пластическими отпечатками с максимальным размером периметра D. Эффективность комбинированной обработки сферообразными гранулами обосновывается характеристиками пластического отпечатка гранулы описанным диаметром $D_Г$. При планировании эффективности обработки поверхности по полноте покрытия пластическим отпечатками надо понимать, что при трехкратном перекрытии каждой точки поверхности этими отпечатками, необработанной останется более 5 % всей площади оболочки [10]. При этом учитываем, что геометрически:

$$D = 0{,}577\, D_Г\,. \tag{3}$$

Шероховатость при обработке поверхности изменяется по мере увеличения ее покрытия пластическими отпечатками $D_{по}$.

$$\Delta R_a = 0{,}5\sqrt{D_Г^2 - 0{,}3D_{по}^2} - \sqrt{D_Г^2 - D^2}\,. \tag{4}$$

Максимально достижимый отпечаток D примерно определяется так:

$$D = \frac{k_{уо} D_Г}{3 sin\beta}\sqrt{\frac{\pi P_{ТК}}{2\sigma_\tau}}\,, \tag{5}$$

где $k_{уо}$ – коэффициент, определяющий влияние в зоне контакта на диаметр отпечатка условий обработки: изменения в процессе обработки контактных сил взаимодействия гранул и поверхностей; кривизны контактирующих поверхностей; исходной шероховатости; поверхностной упаковки гранул; β – угла подачи гранул с жидкостной средой относительно оболочки; $P_{ТК}$ – динамического давления гранулы в точке контакта с поверхностью МПа; $\sigma_т$ – предела текучести, МПа.

Тогда, из (4):

$$\Delta R_a = 0,5D_Г\left[\sqrt{1\text{-}0,035k_{уо}\frac{P_{ТК}}{\sigma_T sin\beta}} - \sqrt{1\text{-}0,05k_{уо}\frac{P_{ТК}}{\sigma_T sin\beta}}\right]. \quad (6)$$

Из (6) очевидно, что величина ΔR_a определяющим образом зависит от $D_г$, отношения $P_{ТК}/\sigma_т$ и коэффициента $k_{уо}$. Из-за анодного растворения шероховатость [11].:

$$R_a = R_{au} - \Delta R_a - k_{рр}\, v_{ар}\, t_{эх}, \quad (7)$$

где $R_{аи}$ – исходная шероховатость, мкм; $\nu_{ар}$ – скорость растворения материала, мкм/мин; $t_{эх}$ – время протекания электрохимического процесса, мин.

С учетом (7)

$$\Delta R_a = 0,5D_Г - 0,5D_Г\sqrt{0,015k_{уо}\frac{P_{ТК}}{\sigma_T sin\beta}} + k_{рр}v_{ар}t_{эх}, \quad (8)$$

где $k_{рр}$ – коэффициент равномерности растворения лункообразного отпечатка (определяется формой сфероподобной гранулы и составляет 0,8-1,0).

За время $t_{эх}$ съем дефекта в виде окисных плен и их хлопьев гарантирован. Характерный уклон выступов шероховатости, необходимый для равномерности распределения припоя в зоне пайки определяется углом β подачи потока гранул с жидкостной средой относительно оболочки. Учитывая, что снятие дефектов по шероховатости достаточно не более, чем на 20 % от исходной высоты неровностей $R_{аи}$ имеем

$$sin\beta = \sqrt{\frac{\left(0,2R_{au}{}^2 - R_Г^2 + k_{рр}{}^2 v_{ар}{}^2 t_{эх}{}^2\right)\sigma_T}{R_Г^2\, 0,015k_{уо}P_{ТК}}}. \quad (9)$$

По формуле (9) задаваясь параметрами обработки, большинство из которых технологически управляемо, находится угол, при этом ориентированный поток гранул формирует нужные уклоны на выступах шероховатости. Время активации по [1, 2]:

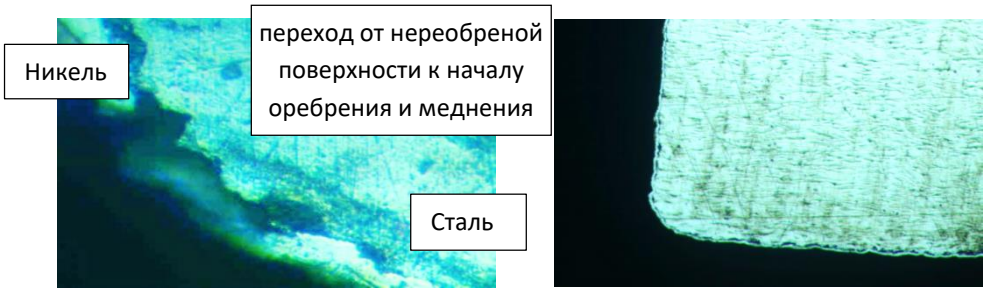
$$T_{ак} = t_{ai}\, n(t)\, S_{па} = [n(t)\, S_{па}\, x_0\, e^{\sim Ea\, Aк\, T} K_{рм}] \cdot t_{ос} / t_п, \quad (10)$$

где $S_{па}$ – площадь поверхности активации; $t_{ос}$ – температура окружающей среды.

Для приближенных расчетов время активации принимают длительность цикла гальвано-химической обработки, струйной очистки, ионно-плазменного полирования, ультразвуковой комбинированной обработки и т. д

Первые эксперименты были посвящены выявлению возможности для ускорения процесса оставить в маршруте подготовки поверхности электрокорунд. После нанесения никелевого и мед-

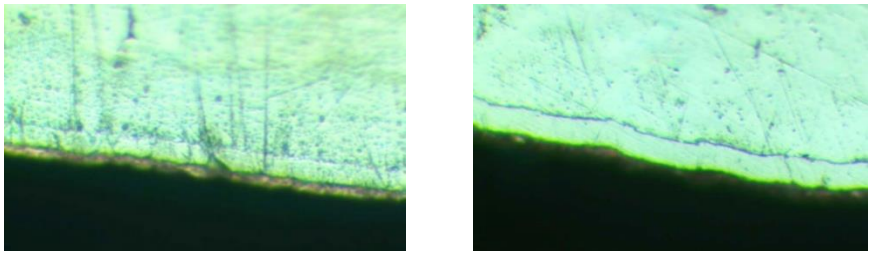
ного покрытий из оболочки камеры были вырезаны образцы № 1, и проведено сравнительное металлографическое исследование с образцами № 2, вырезанных из другой детали, покрытой по действующему технологическому процессу. Перед покрытием выполнялась предварительная струйная обработка электрокорундом (ПСО). По результатам сравнительного металлографического исследования установлено, что толщина никелевого покрытия соответствует требованиям документации и составляет 6–10 мкм в образце №2 (с ПСО) и 10–12 мкм в образце №1 (без ПСО). При этом во всех исследованных образцах, вырезанных из детали №2 (с ПСО), под слоем покрытия наблюдается скопление пор и неметаллических включений (рис. 7).



x1000 x100

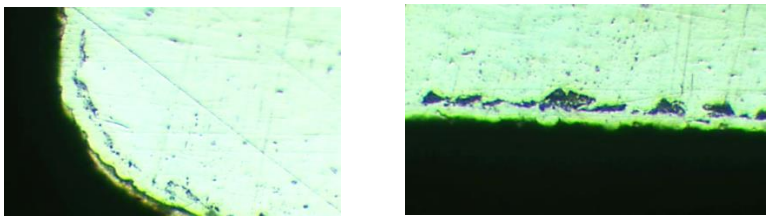
Рисунок 7 – Микроструктура образцов №2 (с ПСО)

Во всех образцах без ПСО никелевое покрытие плотное, без неметаллических включений и пор (рис. 8). Дополнительно, с целью определения качества сцепления никелевого покрытия с основным материалом оребрённой стенки, вырезанные образцы подверглись нагреву до 200 °С в электрической печи, а также в вакууме 10^{-4} мм рт.ст [12]. После нагрева как в открытой печи, так и в вакууме до 200˚С в микроструктуре образцов с ПСО по границе никелевое покрытие-сталь выявлены скопления пор и неметаллических включений, как в исходном состоянии (рис. 9).



а) x500 б) x500

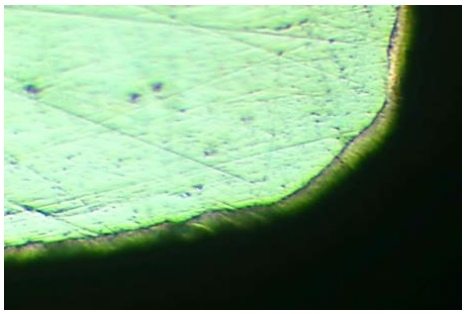
Рисунок 8 – Микроструктура неоребрённой зоны (а) и ребра (б) образцов без ПСО



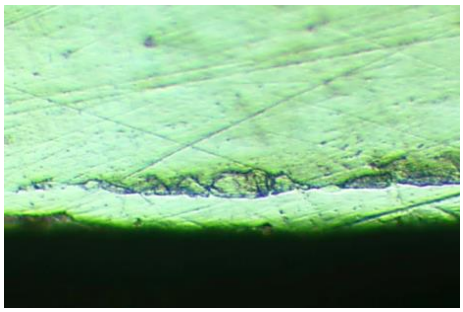
а) x500 б) x500

Рисунок 9 – Микроструктура никелевого покрытия образцов с ПСО после нагрева до 200 ˚С в открытой печи (а) и в вакууме 10^{-4} мм.рт.ст.

Микроструктура образцов, вырезанных из детали без ПСО, после нагрева до 200 ˚С в открытой печи характеризуется наличием плотного сцепления никелевого покрытия со сталью (рис. 10, а), однако на отдельных участках наблюдается отслаивание никелевого покрытия с величиной раскрытия 2-4 мкм (рис. 10, б).



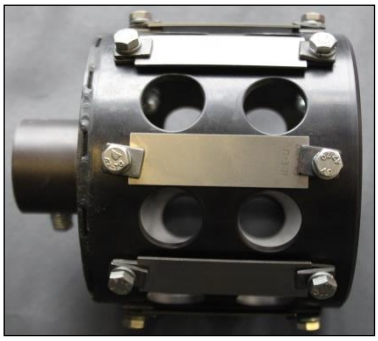
а) х500



б) х500

Рисунок 10 – Микроструктура никелевого покрытия образцов №1 (без ПСО)

Как мы и предполагали, обдувку электрокорундом надо исключать однозначно. Однако результаты на рис. 10 показали правильность и другого научно обоснованного предположения о недостаточности удаления шаржирования только проведением предварительного электрополирования и активации на обратном токе, чтобы в ванне предварительного никелирования достичь нужной активации поверхности и смачиваемости припоем [13]. Появившийся на пиках шероховатости дефектный слой материала снимали комбинированной обработкой токопроводящими гранулами из никелевого сплава с приведенным диаметром ≈ 150 мкм. Обработка образцов, закрепленных в оснастке с вращением для равномерности (рис.11) проводилась с наложением тока низкого напряжения 3-7 В.



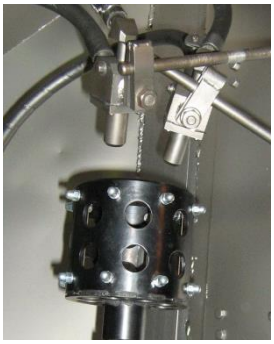


Рисунок 11 – Оснастка в сборе с образцами и камера экспериментального устройства

Время обработки каждого образца 15 с; угол подачи потока гранул к поверхности от 10 до 30 град.; скорость вращения оснастки 40 мин$^{-1}$; давление сжатого воздуха в потоке 0,3 МПа; Жидкостная среда состояла из разбитых потоком воздуха капель слабо проводной воды. Для исключения шаржирования поверхностного слоя оболочки брали гранулы из никелевого высокопрочного сплава, идентичного материалу обрабатываемой штатной детали. Контроль предотвращения избыточного наклепа и, следовательно, короблений нежестких оболочек, проводился по прогибу настроечных и контрольных пластинок Альмена (Z = 0,03-0,05 мм). Направленные под малым углом к активированной поверхности гранулы (рис. 6) за счет анодного эффекта удаляли по вершинам микровыступов дефекты, а гребешки шероховатости механически деформировали под заданным углом. Создавалась благоприятная разнонаправленная морфология микрорельефа для растекания припоя. Результаты эксперимента показаны на

диаграмме 1. Проверка прочности последующих покрытий припоем проводилась методом царапин. Результаты, показанные на рис. 12 показали эффективность нового подхода к подготовке поверхностей оребренных оболочек к пайке.

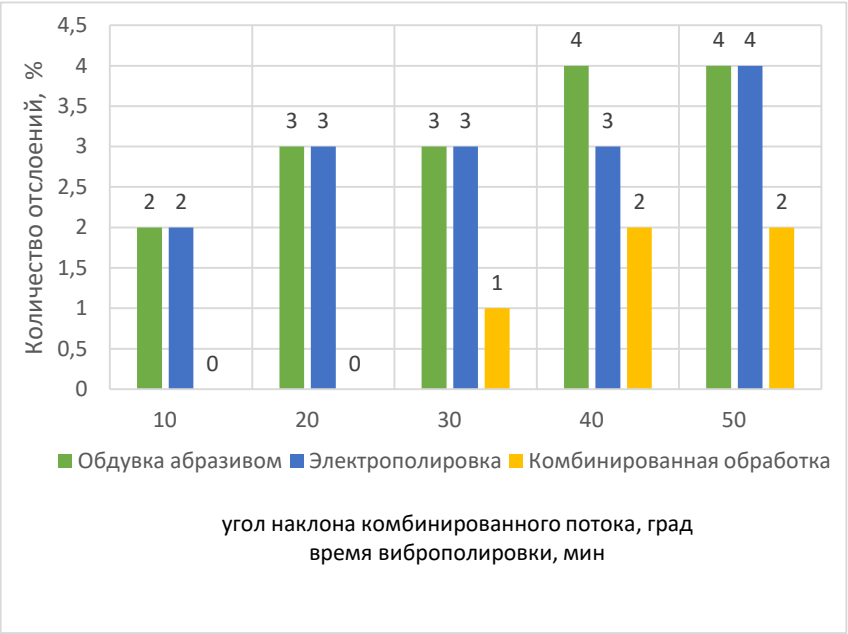


Рисунок 12 – Результаты прочности сцепления припоя после различной подготовки поверхности

На рисунках 13 и 14 показаны результаты гидроиспытаний до разрушения по штатной технологии и после внедрения новых технических решений.

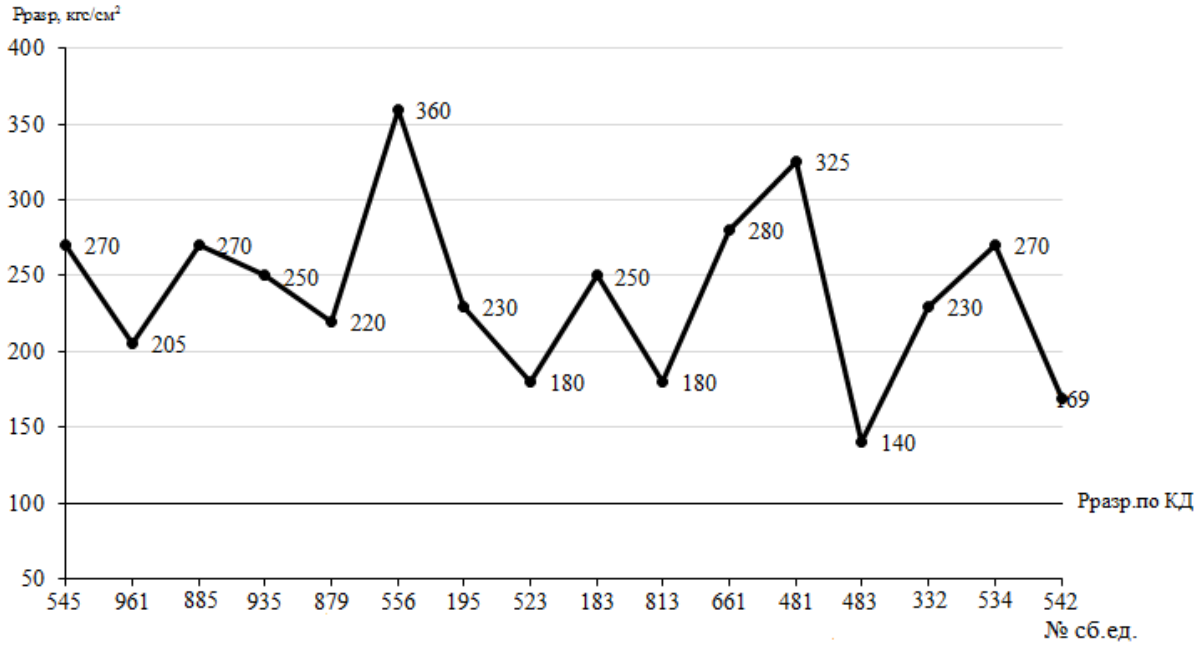


Рисунок 13 – Результаты гидроиспытаний до разрушения по штатной технологии

Как видно из графика (рис. 13) давление разрушения отличаются более чем в два раза, от 140 кгс/см^2 до 360 кгс/см^2, что говорит о нестабильности качества и прочности паяных соединений. При этом, в соответствии с графиком 14, давление разрушения изменяется от 325 кгс/см^2 до 390 кгс/см^2.

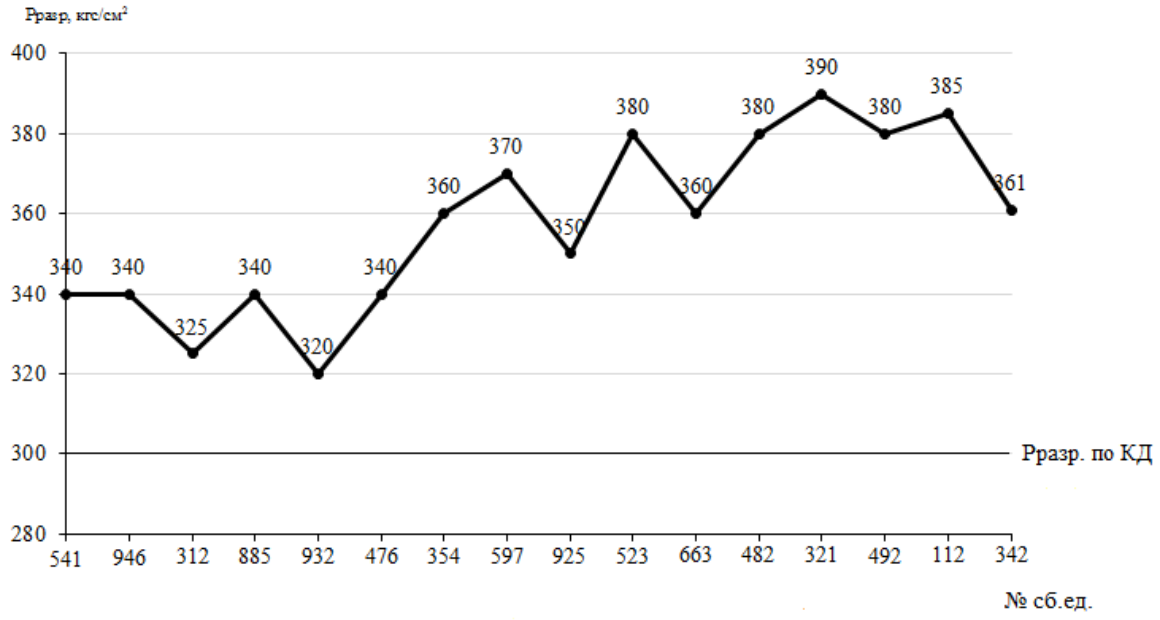
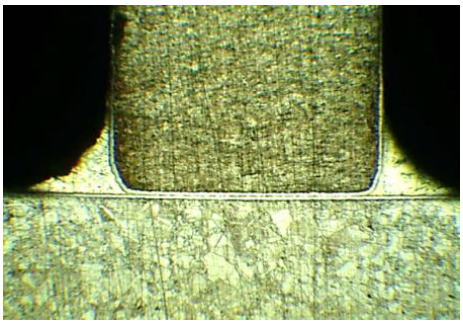
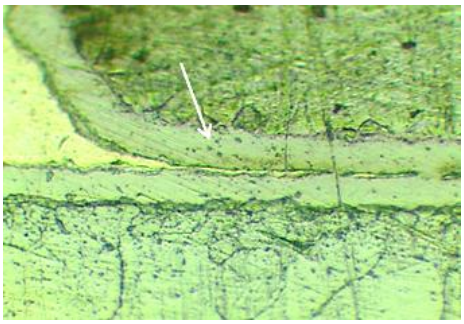


Рисунок 14 – Результаты гидроиспытаний до разрушения на модельных режимах после внедрения новых технических решений

Столь высокая нестабильность прочности паяных сборок наиболее вероятно связана с наличием пор в никелевом покрытии, что подтверждается тем, что согласно ГОСТ9.301-86 они не нормируются, а, следовательно, при покрытии деталей под пайку не могут иметь постоянных размеров и количества. Анализ рисунка 15 показывает, что после комбинированной активации паяное соединение удовлетворительное, галтели сформированы, в никелевом покрытия, преимущественно со стороны рёбер, наблюдаются редкие отдельные мелкие поры размером менее ~2 мкм. В ранее исследованных сборках, изготовленных с применением ПСО и гидроочистки, поры имеют недопустимые значения до 20 мкм и присутствуют повсюду в большем количестве.



x50



x200

Рисунок 15 – Соединение медно-серебряным припоем

Новый технологический подход позволил снизить на 10 % трудоемкость подготовки под пайку оребренных нежестких оболочек оживальной формы. Эти мероприятия перспективны для всех деталей подобного типа, а не только в ракетостроении: авиационном двигателестроении, энергетике и др. Предложена новая методика технологического обеспечения подготовки поверхностей нежестких оребренных оболочек оживальной формы с комбинированной активацией под пайку:

1. Экспертиза и планирование: оценка целесообразности комбинированной активации поверхностей под пайку в тех случаях, когда возможно применение традиционных методов и средств; выбор методов и средств обработки сопрягаемых поверхностей применительно к конструкции оребренных оболочек оживальной формы; составление технологического маршрута сборки применительно к конструкции тонкостенных оребренных оболочек.

2. Подготовка: механическая зачистка видимых дефектов закрепленным абразивом с проверкой мест шаржирования и устранения их; удаление заусенцев по выступам оребренных оболочек оживальной формы без притупления угла более R0,1+0,1 мм по кромкам; для нержавеющих материалов проводят промывку и обезжиривание растворением загрязнений в нефрасе или тринатрийфосфате;

3. Активация и нанесение припоя: электрополирование или химическое травление растворами, соответствующими марке материалов оболочек; обдувка потоком токопроводящих гранул сферической формы в жидкостной среде из мягкого никелевого сплава с углом подачи к поверхности не более 20 град; нанесение гальванического никеля слоем до 15 мкм, если по составу металла тонкостенных оболочек процесс пайки не гарантирует растекание и смачивание припоя по поверхности и не образует надежное соединение; гальваническое нанесение припоя (см. выше).

4. Пайка сборки оболочек в вакуумной печи или контейнере по типовому технологическому процессу.

5. Контроль. Проверка по обнаружению внутренних дефектов различного вида радиационной дефектоскопией. Проверка по обнаружению сквозных дефектов испытанием на герметичность воздушно-гелиевой смесью. Металлографические исследование шлифов образцов-свидетелей или имитирующих паяный узел технологических сборок.

4 Обсуждение и заключение

Решена проблема научно-технического формирования комплексного технологического обеспечения активационной обработки поверхностей тонкостенных оболочек под последующую пайку за счет обоснованного применения комбинированных воздействий к элементам оребрения на завершающем этапе, учитывая эксплуатационные условия работы нежестких сборочных единиц.

А также можно сделать следующие выводы:

1. Впервые установлена и научно-технически обоснована несостоятельность использования для активации под пайку нежестких оребренных тонкостенных оболочек (отношение толщины стенки к диаметру до 1 %) абразивно-струйной обработки, что позволяет выделить группу технологического риска по типоразмеру оболочек подобного типа.

2. Впервые к нежестким паяным оболочкам оживальной формы привязана схема комплексного рассмотрения механизма активации и технологического обеспечения с разделением управляемых и неуправляемых факторов, что повышает результативность мероприятий по активации отбрасыванием неуправляемых технологических параметров (температура плавления, толщина зазора и т.п.).

3. С учетом того, что пайка будет достаточно прочной при значении угла смачивания **φ** не более 20°, обосновано технологическое решение подачи в заключительной стадии на оребренную оболочку токопроводящих гранул соответствующего размера, твердости и формы под

нужным углом на определенное время. В результате рельеф будет сглажен под нужным углом, обеспечивая наилучшее растекание припоя и удержание его в строго отведенных местах за счет регулярной волнистости на выступах оребренной оболочки.

4. Разработаны принципы технологического удаления дефектного слоя материала, который снимали комбинированной обработкой токопроводящими гранулами из никелевого сплава с приведенным диаметром ≈ 150 мкм. Обработка проводилась с наложением тока низкого напряжения 3-7 В; время обработки 15 с; угол подачи потока гранул к поверхности от 10º до 20º; скорость вращения оснастки 40 мин$^{-1}$; давление сжатого воздуха в потоке 0,3 МПа. Для исключения шаржирования поверхностного слоя оболочки брали гранулы из никелевого высокопрочного сплава, идентичного материалу обрабатываемой штатной детали, чего не было ранее.

5. Разработаны средства технологического оснащения, имитирующие штатные оболочки, позволяющие совместить все элементы формы в комплексной технологической отработке режимов активации поверхностей нежестких оребренных оболочек оживальной формы под пайку.

6. Предложена новая методика технологического обеспечения качества подготовки поверхностей нежестких оребренных оболочек оживальной формы с комбинированной активацией поверхностей под последующую пайку, что позволяет сформировать единый подход для всех типоразмеров аналогичных деталей и сборочных единиц.

7. Разработан и внедрен комплексный технологический процесс подготовки поверхностей нежестких оребренных оболочек оживальной формы с комбинированной активацией поверхностей под последующую пайку с трудоемкостью менее на 10 % значений, достижимых ранее. Часть технических решений, используемых в технологии, запатентованы.

8. Показаны пути расширения области использования полученных решений. Эти мероприятия перспективны для всех деталей подобного типа, а не только в ракетостроении: авиационном двигателестроении, энергетике и др. техники.

Список литературы

1 Некрылов, А. М. Упрочняющая и отделочная обработка технологически труднодоступных проточных каналов деталей / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2020. – № 7 (109). – С. 20-23.

2 Некрылов, А. М. Повышение производственной технологичности рабочих поверхностей нагруженных деталей применением упрочняющей комбинированной обработки / А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, В.Г. Грицюк // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. – Том Т. 16. –№ 4 (184). – С. 182-186.

3 Грымзин, А. Ю. Технологические методы для комбинированного упрочнения поверхностей при создании сложнопрофильных изделий / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Насосы. Турбины. Системы. 2021. – № 2 (39). –С. 73-78.

4 Подгорнов, С. Н. Технологичность и показатели качества проточных поверхностей после комбинированной обработки / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, С.Н. Коденцев, Г.А. Сухочев // Воронежский научно-технический вестник. 2022. – № 4 (42). – С. 22-28.

5 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnevich S.S. // Materials Today: Proceedings. «International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020». 2021. pp. 1943-1945.

6 Сухочев, Г. А. Технологические методы комбинированного упрочнения поверхностей сложного профиля при создании наукоемких изделий / Г.А. Сухочев, А.Ю. Грымзин, А.М. Некрылов, С.Н. Подгорнов, С.Н. Коденцев // Материалы XI Междун. науч.-практ. конф. «Инновации в Машиностроении» (ИнМаш-2020), Бийск, 22-23 октября 2020 г. С. 54-60.

7 Подгорнов, С. Н. Пути повышения производственной технологичности оребренных оболочек упрочняющей комбинированной обработкой / С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев, С.С. Юхневич // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ВГТУ, вып. 13, 2020. – С.97-101.

8 Грымзин, А. Ю. Применение упрочняющей комбинированной обработки нагруженных деталей для повышения производственной технологичности / А. Ю. Грымзин, С. Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2020. – С. 199-201.

9 Грымзин, А. Ю. Технологическое обеспечение расходных характеристик деталей с мелкоразмерными проточными каналами / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев, С.С. Юхневич // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр., Воронеж: ВГТУ, вып. 14, 2021. – С.94-98.

10 Грымзин, А. Ю. Применение комбинированной обработки для увеличения показателей качества лопаточных деталей / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2021. С. – 167-170.

11 Грымзин, А. Ю. Комбинированная отделочно-упрочняющая обработка проточных поверхностей деталей с каналами / А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Г.А. Сухочев // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приор. напр. развит. науки и технологий. Воронеж, ВГТУ, 2022. С. 87-89.

12 Патент №2788444 Российская Федерация, B23H 5/06, B23B 09/00. Способ упрочнения внутренних поверхностей каналов деталей [Текст] / Г.А. Сухочев, А.М. Некрылов, А.Ю. Грымзин, С.Н. Подгорнов, Д. В. Силаев; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. № 2022100797, заявл. 25.05.20219; опубл. 19.01.2023, Бюл. №2. - 8с.

13 Патент №2680117 Российская Федерация, B23K 1/012, B23K 1/19 Способ пайки двухслойных паяных конструкций / М.А Кашапов, Н.Г. Иванов, В.В. Федоров, А.С. Грибанов, А.В. Гребенщиков, С.Н, Подгорнов; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко" -№2017106620, заявл. 28.02.2017; опубл. 15.02.2019, Бюл. №5. - 8с.

References

1 Nekrylov A.M. Hardening and finishing processing of technologically hard-to-reach flow channels of parts / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, V.N. Sokolnikov, G.A. Sukhochev//High technologies in mechanical engineering. 2020. No. 7 (109). pp. 20-23.

2 Nekrylov A.M. Improving the production manufacturability of working surfaces of loaded parts using hardening combined processing / A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev, S.N. Kodentsev, V.G. Gritsyuk // Strengthening technologies and coatings. 2020. Vol. T. 16. No. 4 (184). pp. 182-186.

3 Grymzin A.Yu. Technological methods for combined hardening of surfaces when creating complex profile products / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Pumps. Turbines. Systems. 2021. No. 2 (39). pp. 73-78.

4 Podgornov S.N. Manufacturability and quality indicators of flow surfaces after combined processing / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, S.N. Kodentsev, G.A. Sukhochev // Voronezhsky Scientific and Technical Bulletin. 2022. No. 4 (42). pp. 22-28.

5 Technological methods for processing non-rigid finned shells of power plants / Suhochev G.A., Podgornov S.N., Grymzin A.U., Yukhnevich S.S. // Materials Today: Proceedings. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020". 2021.pp. 1943-1945.

6 Sukhochev G.A. Technological methods of combined hardening of surfaces of a complex profile when creating science-intensive products / G.A. Sukhochev, A.Yu. Grymzin, A.M. Nekrylov, S.N. Podgornov, S.N. Kodentsev // Proceedings of the XI Intern. scientific-practical. conf. "Innovations in Mechanical Engineering" (InMash-2020), Biysk, October 22-23, 2020, pp. 54-60.

7 Podgornov S.N. Ways of increasing the production manufacturability of finned shells by strengthening combined treatment / S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev, S.S. Yukhnevich // Modern production technologies in mechanical engineering: collection of scientific tr., Voronezh: VSTU, issue 13, 2020. pp.97-101.

8 Grymzin A.Yu. Application of hardening combined processing of loaded parts to improve production manufacturability / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of development of science and technology. Voronezh, VSTU, 2020. S. 199-201.

9 Grymzin A.Yu. Technological support of consumable characteristics of parts with small-sized flow channels / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev, S.S. Yukhnevich // Modern production technologies in mechanical engineering: collection of scientific tr., Voronezh: VSTU, issue 14, 2021. pp.94-98.

10 Grymzin A.Yu. The use of combined processing to increase the quality indicators of blade parts / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the competition of scientific research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of science and technology development. Voronezh, VSTU, 2021, pp. 167-170.

11 Grymzin A.Yu. Combined finishing and hardening treatment of flow surfaces of parts with channels / A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, G.A. Sukhochev // Scientific support of the Voronezh region: Sat. tr. winners of the scientific research competition. works of students and graduate students of VSTU on prior. e.g. developed. science and technology. Voronezh, VSTU, 2022, pp. 87-89.

12 Patent No. 2788444 Russian Federation, B23H 5/06, B23B 09/00. The method of hardening the internal surfaces of the channels of parts [Text] / G.A. Sukhochev, A.M. Nekrylov, A.Yu. Grymzin, S.N. Podgornov, D. V. Silaev; applicant and patentee Voronezh State Technical University. No. 2022100797, claim. May 25, 20219; publ. 01/19/2023, Bull. No. 2. - 8s.

13 Patent No. 2680117 Russian Federation, B23K 1/012, B23K 1/19 Method of soldering double-layer soldered structures / M.A. Kashapov, N.G. Ivanov, V.V. Fedorov, A.S. Gribanov, A.V. Grebenshchikov, S.N., Podgornov; applicant and patent holder Joint Stock Company "NPO Energomash named after Academician V.P. Glushko" -No.2017106620, application 28.02.2017; publ. 15.02.2019, Bul. No. 5. - 8c.

© Сухочев Г.А., Подгорнов С.Н., 2023