

Тип статьи: дискуссионная  
УДК 62-233.132  
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-130-140

## РАССМОТРЕНИЕ УСТРОЙСТВ И СПОСОБОВ УПРОЧНЕНИЯ ГАЛТЕЛЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ППД, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ

Александр Михайлович Михальченков<sup>1</sup>, Юрий Игоревич Филин<sup>2</sup>,  
Анна Анатольевна Тюрева<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Брянский государственный аграрный университет, г. Брянск, Российская Федерация  
<sup>1</sup>mihalchenkov.alexandr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3104-2548>  
<sup>2</sup>rock2032@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0000-3012-8070>  
<sup>3</sup>tyreva@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Михальченков,  
mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

Corresponding author: Alexander Mikhalchenkov, mihalchenkov.alexandr@yandex.ru

**Реферат.** Ресурс тяжело нагруженных валов во многом определяется степенью напряженного состояния участка перехода от одного диаметра к другому. Существует достаточно большое количество методов снижения концентрации напряжений данных областей, однако особое место в данном случае занимает упрочнение поверхностей непрофильных тяжело нагруженных валов. Прежде всего, упрочнению подвергаются их галтели, что приводит к образованию сжимающих равномерно распределенных напряжений в технологической зоне и, соответственно, увеличению усталостной прочности таких деталей. Особое распространение метод получил при упрочнении коленчатых валов. Наряду с этим, поверхностное упрочнение применительно к вышеупомянутой детали используется для устранения ее изгибов. Особенно важен такой технологический процесс в случае восстановления деталей вращения. Между тем, существующие работы в данной области не решают имеющихся вопросов. В связи с этим, необходимо дать критический анализ способам и конструкциям для ППД галтелей с выработкой соответствующих предложений, что определяет актуальность работы. Целью исследования является рассмотрение устройств и способов упрочнения галтелей тел вращения ППД, их классификация и разработка рекомендаций по совершенствованию. Для раскрытия цели авторами проведено всестороннее рассмотрение имеющейся в открытом доступе информации в отношении упрочнения галтелей их наклепом. Это позволило выявить их достоинства и недостатки. Прежде всего, это отсутствие единой системы классификации, а также методов предотвращения образования «волны деформирования». На основании анализа предложена классификация, основанная на факторах, определяющих свойства валов и качество их поверхностных слоев и функциональном назначении обработки. Предложена собственная схема обработки ППД поверхностей, обеспечивающая предотвращение «волны деформирования» за один проход рабочего инструмента, которая базируется на известных положениях теории о внедрении шарового индентора в твердое тело.

**Ключевые слова:** пластическое деформирование; упрочнение галтелей; упрочняющие устройства; методы упрочнения; классификация; «волна деформирования».

## CONSIDERATION OF DEVICES AND METHODS FOR STRENGTHENING THE GALTELS OF BODIES OF ROTATION OF PPD, THEIR CLASSIFICATION AND DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR IMPROVEMENT

Alexander Mikhalchenkov<sup>1</sup>, Yuri Filin<sup>2</sup>, Anna Tyureva<sup>2</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup>mihalchenkov.alexandr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3104-2548>

<sup>2</sup>rock2032@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0000-3012-8070>

<sup>3</sup>tyreva@yandex.ru

**Abstract.** *The service life of heavily loaded shafts is largely determined by the degree of stress in the transition area from one diameter to another. There are a fairly large number of methods for reducing the stress concentration of these areas, but a special place in this case is occupied by strengthening the surfaces of non-profile, heavily loaded shafts. First of all, their fillets are subjected to hardening, which leads to the formation of uniformly distributed compressive stresses in the technological zone and, accordingly, an increase in the fatigue strength of such parts. The method has become especially widespread when hardening crankshafts. Along with this, surface hardening is applied to the above-mentioned part to eliminate its bending. This technological process is especially important in the case of restoration of rotating parts. Meanwhile, existing work in this area does not solve existing issues. In this regard, it is necessary to give a critical analysis of the methods and designs for PPD fillets with the development of appropriate proposals, which determines the relevance of the work. The purpose of the study is to consider devices and methods for strengthening fillets of bodies of rotation of PPD, their classification and development of recommendations for improvement. To reveal the goal, the authors conducted a comprehensive review of the information available in the public domain regarding the strengthening of fillets by cold hardening. This made it possible to identify their advantages and disadvantages. First of all, this is the lack of a unified classification system, as well as methods for preventing the formation of a "wave of deformation". Based on the analysis, a classification is proposed based on the factors that determine the properties of the shafts and the quality of their surface layers and the functional purpose of the processing. A proprietary scheme for processing SPD surfaces is proposed, which ensures the prevention of a "wave of deformation" in one pass of the working tool, which is based on the well-known principles of the theory of the introduction of a ball indenter into a solid.*

**Keywords:** *plastic deformation; strengthening of fillets; strengthening devices; hardening methods; classification; "wave of deformation".*

**Для цитирования:** Михальченков А.М., Филин Ю.И., Тюрева А.А. Рассмотрение устройств и способов упрочнения галтелей тел вращения ППД, их классификация и разработка рекомендаций по совершенствованию // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 130-140. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-130-140>.

**For citation:** Mihalchenkov A., Filin Yu., Tyureva A. Consideration of devices and methods for strengthening fillets of bodies of rotation of PPD, their classification and development of recommendations for improvement. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 130-140. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-130-140>.

**Введение.** Прочностные показатели тяжело нагруженных и сложнопрофильных тел вращения во многом определяются напряженным состоянием в области перехода от одного диаметра к другому [1]. Существенное снижение концентрации напряжений и увеличение прочности ( $\sigma_b$ ) на этих участках достигается за счет формирования скруглений (галтелей) [2]. Однако их наличие не всегда обеспечивает необходимую  $\sigma_b$ , особенно в случаях, когда деталь эксплуатируется в условиях знакопеременных нагрузок [3] либо была подвержена технологическим операциям, связанным с ее восстановлением [4]. Одним из распространенных методов упрочнения галтелей является их поверхностное пластическое деформирование (ППД) [5]. Улучшение служебных свойств в этом случае происходит, в основном, путем образования сжимающих остаточных напряжений ( $\sigma_0$ ) и их равномерного распределения [6]. Упрочнение поверхностным наклепом также применяется и для устранения изгибов валов, являющихся следствием эксплуатации или нарушения технологии изготовления (восстановления).

В то же время, многочисленные способы и устройства для проведения ППД галтелей до конца не решают всего комплекса задач, возникающих в реальных условиях исполнения технологического процесса упрочнения, а также последующего использования деталей. Прежде

всего практики сталкиваются с проблемой образования «волны деформирования» в виде выступающей области в зоне проведения ППД. Ликвидация этого образования требует проведения дополнительных технологических мероприятий, нередко нивелирующих эффект от упрочнения.

Кроме того, отсутствует сколь-нибудь, строгая классификация существующих методов и устройств ППД галтелей в соответствии с параметрами, определяющими служебные свойства изделия, и функциональное назначение.

Цель работы состоит в рассмотрении устройств и способов упрочнения галтелей тел вращения ППД, разработке классификации и рекомендаций по их совершенствованию.

**Методология проведения исследования.** Методической основой исследования является аналитический метод, который применяется для выявления существенных положительных и отрицательных сторон способов и конструкций для упрочнения галтелей валов ППД. Информационные базы, включающие научные труды, посвященные исследованиям процессов пластического деформирования поверхностей металлических тел, а также информацию об изобретениях в данной области науки. При обработке информационных материалов использовались методы системного анализа, монографический, абстрактно-логический и другие общенаучные способы.

**Результаты и обсуждение.** Для повышения усталостной прочности валов, эксплуатирующихся в условиях циклических нагрузок, авторами [7] предложен инструмент, позволяющий проводить поверхностное упрочнение галтелей ППД с обеспечением равномерной глубины распространения деформации по всему профилю обрабатываемой зоны. Он выполнен в виде клинового ролика с рабочим участком, образованным пересечением двух торов под углом друг к другу, а рабочий участок изготовлен с переменным радиусом профиля (рисунок 1). Использование такой компоновки обеспечивает создание областей сжимающих напряжений и приводит к росту прочностных показателей поверхностной зоны в районе пластического деформирования. Это приводит к падению  $\sigma_b$  на структурном уровне и уменьшению вероятности образования и развития микротрещин, а также уменьшает влияние концентратора напряжений. К сожалению, заключение автора не имеет экспериментального подтверждения, а вопросы, относящиеся к образованию «волны деформирования» и методы ее устранения вообще не рассматриваются.

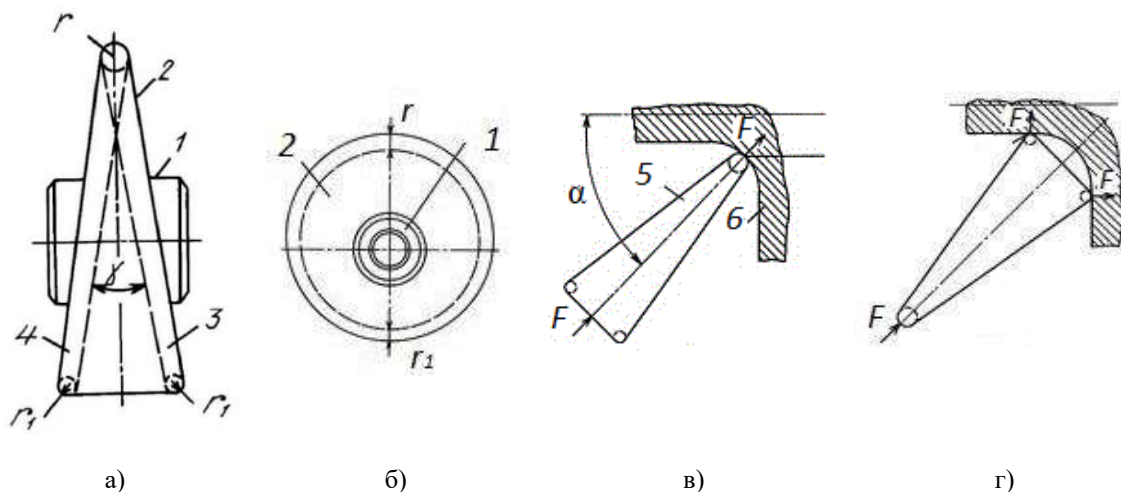


Рисунок 1 - Устройство для ППД галтелей деталей вращения: а – главный вид; б – вид сбоку; в-г – схемы взаимодействия инструмента с галтелью (1 - оправка, 2 - клиновой ролик с рабочим участком, 3 и 4 – торы; 5 – вершина клина; 6 – галтель; " $\gamma$ " – угол пересечения торов; F – постоянное усилие;  $\alpha$  - угол наклона ролика; r - максимальный радиус профиля ролика;  $r_1$  - минимальный радиус профиля ролика)

В работе [8] предложен способ чистовой и одновременно упрочняющей обработки поверхностей валов обкаткой клиновым роликом (рисунок 2) всей рабочей поверхности детали за один проход. Достоинством способа следует считать наличие деформированного поверхностного слоя значительной глубины и волнистости по всему профилю. Неизменность угла вдавливания ролика в обрабатываемую поверхность позволяет обеспечить равномерное деформирование поверхности и, соответственно, увеличить ресурс детали. Для рассматриваемого случая волнистость рабочей поверхности детали является положительным фактором, в отношении же распределения деформации по глубине, сведения не конкретизируются.

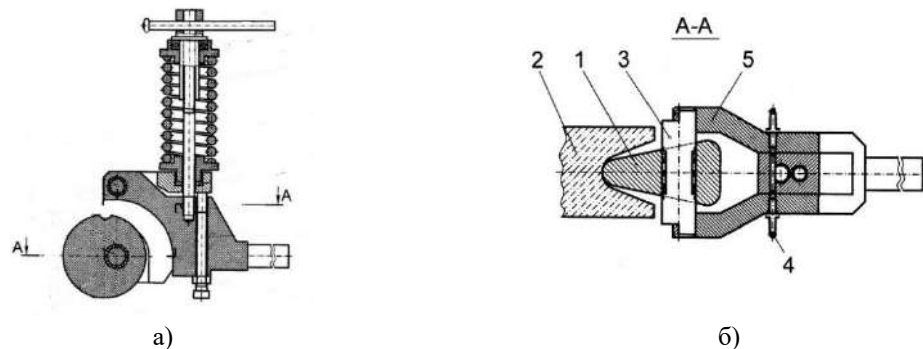


Рисунок 2 - Конструкция для чистовой и упрочняющей обработки поверхностей валов сложного профиля: 1 – клиновой ролик; 2 – деталь; 3 – ось; 4 – рым-болты; 5 – рычаг (а – общий вид; б – роликовый узел)

По мнению [9] обработка галтели, включающая резание и последующее холодное пластическое деформирование инструментом с профильным радиусом (рисунок 3), позволяет повысить предел выносливости детали за счет повышения уровня пластической деформации. При этом галтель становится практически равнопрочной с гладкой частью вала. Следует полагать, что наличие процесса точения в определенной мере позволит нивелировать выступы от последующего деформирования. В тоже время, обработка детали достаточно сложна в исполнении.



Рисунок 3 – Способ формирования упрочненной галтели (а – резание; б – пластическое деформирование)

Получение постоянной величины наклепа при накатывании валов с переходными галтелями, достигается применением устройства, предложенного в работе [10] (рисунок 4). Конструкция содержит корпус, в котором установлены державка с инструментом в виде ролика, расположенным под углом к оси его вращения, и силовой механизм в виде подпружиненного упора с дополнительной пружиной. Она снабжена двумя симметрично расположенными относительно оси державки клиновыми передаточными механизмами, одна часть которых установлена с возможностью взаимодействия с рабочим инструментом, а другая - с дополнительной силовой пружиной. Усилие накатывания будет автоматически создаваться двумя пружинами, что обеспечивает постоянный уровень упрочнения на всей обрабатываемой

радиусной поверхности вращения, в том числе, и на сопряженных с ней галтелях. Применение такого способа, безусловно, снизит степень волнистости продеформированной поверхности, но до конца исключить ее вряд ли возможно. Однородность деформаций по всей поверхности также вызывает сомнения.

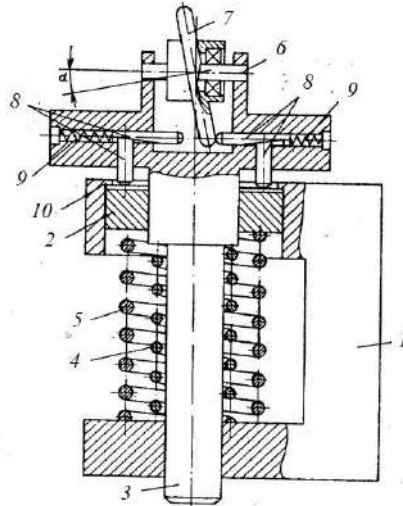


Рисунок 4 – Конструкция для ППД галтелей (1- корпус; 2 – втулка; 3 – державки; 4,5 – пружины; 6 - ось; 7 – ролик; 8 – два клиновых передаточных механизма; 9 – пружины для передаточных механизмов; 10 – выступ)

Способ упрочнения галтелей деталей ППД обкаткой роликом, перемещаемым в направлении от галтели к пригалтельной зоне, обеспечивает увеличение предела усталостной прочности деталей, так как обкатку осуществляют в обе стороны от галтели, обеспечивая перекрытие технологических зон, причем сначала обкатывают галтель и менее нагруженную пригалтельную зону (рисунок 5) [11]. Такой подход позволит избежать образования волнистости рабочей поверхности. Перекрытие зон деформирования, безусловно, обеспечит высокое качество поверхности, однако сложность реализации способа не позволяет рекомендовать его к широкому внедрению.

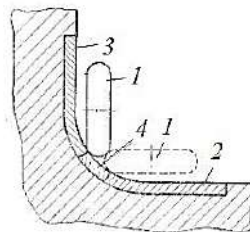


Рисунок 5 - Схема установки ролика при обработке галтелей (1 – ролик; 2 – менее нагруженная пригалтельная зона; 3 – более нагруженная пригалтельная зона; 4 – перекрытие зон обкатки)

Равномерность упрочнения пластической деформацией поверхности галтелей коленчатого вала и исключение искривления его оси, в соответствии с исследованиями [12], может быть достигнута одновременной обкаткой тремя, расположенными вокруг шейки, парами профильных роликов. Размеры профильных частей выполнены, охватывающими поле допусков геометрических параметров профиля галтели. При этом рабочее усилие сообщают одной паре роликов в радиальном направлении к центру обрабатываемого вала (рисунок 6). Авторы не объясняют, каким образом устраняется «наплыв» металла после завершения процесса обработки.

Кроме того, реализация технологии сопровождается существенными силовыми нагрузками как на исполнительные органы, так и на сопрягаемые детали конструкции.

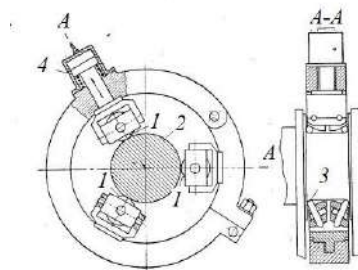


Рисунок 6 – Схема упрочнения галтелей (1 – ролики; 2 – шейка коленчатого вала; 3 – галтели вращающегося коленчатого вала; 4 – гидроцилиндр)

Конструкция для ППД галтелей коленчатых валов 4 (рисунок 7 а) [13] имеет обойму 1 с поддерживающими опорными роликами 2 и сепаратор, с установленными под некоторым углом к его горизонтальной оси деформирующими роликами 3. Для уменьшения коробления деталей и компенсации неточностей размеров, опорный ролик выполнен с двумя коническими поверхностями по концам, обращенными основаниями конусов друг к другу и контактирующими с деформирующими роликами, опорная поверхность которых изготовлена конической, а рабочая торовой. В данном случае конструкция предназначена для снижения вероятности нарушения размерной стабильности коленчатых валов путем наведения полей остаточных напряжений соответствующего знака. Схемой процесса не предусмотрена операция по устранению геометрических следов деформации.



Рисунок 7 – Способы, влияющие на размерную стабильность детали: а – снижение степени коробления; б – устройство прогиба

Наличие прогиба коленчатого вала можно устранить ППД галтелей с приложением максимального усилия со стороны вогнутости [14]. Так как вал вращают, то обкатку следует осуществлять начиная с шейки, где фиксируется максимальный прогиб, заканчивая шейкой, имеющей минимальный (рисунок 7 б). Перед операцией упрочнения партию коленчатых валов подвергают поверхностной закалке токами высокой частоты. После проведения ППД усталостная прочность увеличивается на 10-20%. Предлагаемые технологические операции вряд ли приведут к заметным результатам по устранению прогибов коленчатых валов из-за его сложной геометрической формы и наличия термоупрочняющей обработки. Кроме этого, способ не предусматривает удаления «волны деформирования».

Избежать образования «волны деформирования» можно применив однороликовое устройство, позволяющее изменять рабочее усилие при одновременном плавном перемещении исполнительного инструмента по профилю галтели с сохранением его нормального положения в любой момент времени обкатывания (рисунок 8) [15]. Тем не менее, авторы не исключают последующего шлифования.



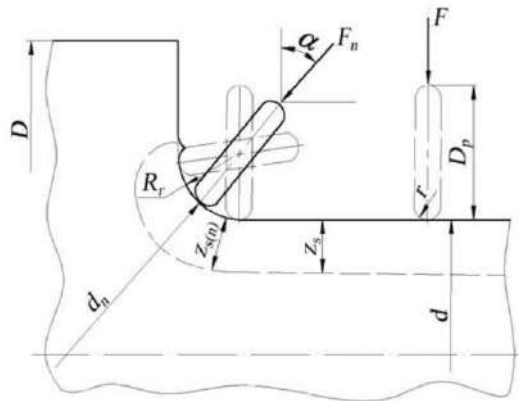


Рисунок 8 - Обкатка с подачей ролика по профилю галтели ( $D, d$  – диаметры участка валов;  $r$  – радиус профиля ролика;  $F$  - рабочая нагрузка;  $\alpha$ - угол наклона ролика;  $F_n$  – усилие обкатки;  $z_{s(n)}$  – глубина упрочненного слоя ;  $R_r$  – радиус галтели ;  $d_n$  – расчетный диаметр вала;  $Z_s$  – заданная глубина деформированного слоя;  $D_p$  – диаметр ролика)

На основании проведенного анализа методов и конструкций обработки галтелей ППД предлагается их классификация по двум признакам: 1 – параметры, определяющие свойства валов и качество их поверхностных слоев; 2 – функциональное назначение обработки (рисунок 9). (Вопросам классификации ППД посвящены работы Иркутского научно-технического университета [16, 17, 18]).



Рисунок 9 – Классификация способов ППД галтелей тел вращения

Как уже отмечалось, в процессе обработки образуется «волна деформирования», отрицательно сказывающаяся на качестве поверхности. Методы ее устранения или предотвращения, предлагаемые в анализируемых способах, либо сложны в реализации, либо в значительной степени снижают эффективность упрочнения. Поэтому авторы предлагают собственную схему обработки ППД, обеспечивающую ее предотвращение за один проход рабочего инструмента, которая базируется на известных положениях теории о внедрении шарового индентора в твердое тело [19]. (Излагаемое ниже носит дискуссионный характер).

При внедрении сферического тела в гомогенный материал (рисунок 10 а), согласно «классическим представлениям» [20], образуются поверхностные наплывы (рисунок 10 б) за счет выдавливания материала испытуемого образца. При этом  $V=V_1+V_2$ , где  $V$  - объем лунки,  $V_1$  и  $V_2$  объемы выдавленного материала (рисунок 10 б). Аналогичный процесс будет иметь место и в случае обкатывания галтели шариком, образуя «волны деформации». Для удаления наплывов следует их подвергнуть пластическому деформированию шариками, радиус которых соответствует радиусу кривизны области перехода наплыва к горизонтальной поверхности ( $r$ ) (рисунок 10 в). Образовавшийся наплыв с незначительными геометрическими размерами удаляется прокаткой роликом (рисунок 10 г). Следует полагать, что применение такой схемы деформирования обеспечит отсутствие «волны деформирования» и высокую степень равномерности распределения сжимающих напряжений. Нагрузки на рабочие инструменты ( $P_1$   $P_2$   $P_3$ ) будут определяться диаметрами шариков и ролика, свойствами деформируемого материала и задаваемым уровнем сжимающих напряжений.

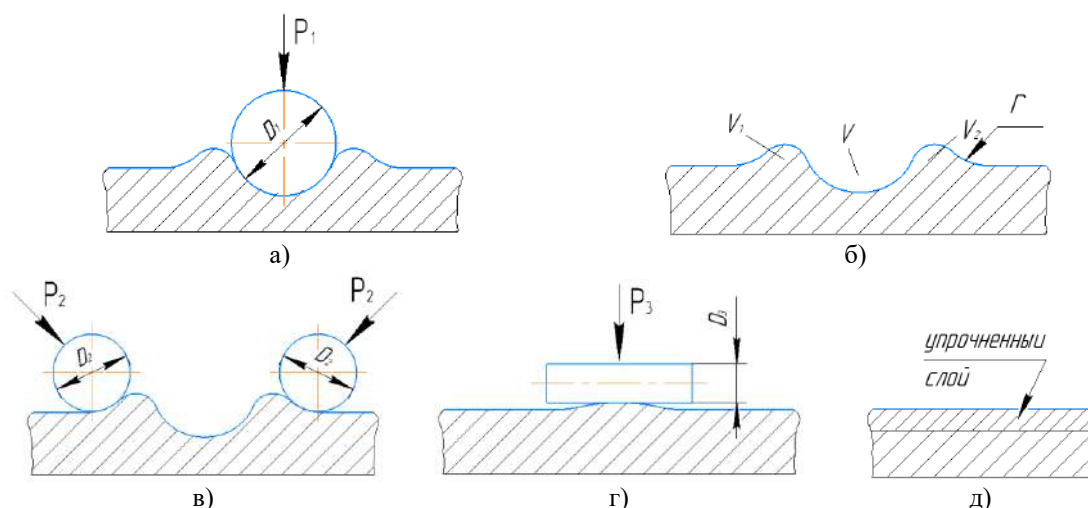


Рисунок 10 – Предлагаемая схема устранения «волны деформирования»

#### Выводы:

1. На основании проведенного аналитического обзора существующих методов и конструкций упрочнения галтелей поверхностным пластическим деформированием, разработана классификация, в основу которой положено следующее: параметры, определяющие свойства валов и качество их поверхностных слоев; функциональное назначение обработки.

2. Предложена схема ППД, обеспечивающая отсутствие «волны деформирования».

#### Список источников

1. Денисов В.А., Слинко Д.Б. Особенности технологии правки и упрочнения коленчатых валов чеканкой галтелей // Труды ГОСНИТИ. - 2016. - Т. 125. - С.182-190.

2. Чайнов Н.Д., Сусликов В.В. Упрочнение коленчатого вала методами поверхностного пластического деформирования // Грузовик. – 2014. – № 3. – С.31-35.



3. Емельянов В.Н., Костин П.В. Компьютерное моделирование процесса коробления пространственных коленчатых валов с пятью шатунными шейками // Вестник Новгородского государственного университета. - 2013. - № 75-1. - С.67-74.
4. Зезюля В.В. Повышение усталостной прочности валов с галтельными переходами после электроконтактной наварки проволокой // Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2014. - № 5. - С.33-38.
5. Костичев В.Э., Денискина Е.А., Попков А.А., Василенко А.А. Влияние протяжённости зоны упрочнения галтельных переходов на многоцикловую усталость коленчатого вала // В сборнике: Математическое моделирование и краевые задачи. Труды десятой Всероссийской научной конференции с международным участием: в 3-х томах. - 2016. - С.125-128.
6. Завистовский С.Э., Завистовский В.Э., Кириенко А.С. Залечивание микротрещин в процессе пневмодинамической обработки галтелей шеек коленчатых валов // В сборнике: Инновационные технологии в машиностроении. Электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета. Полоцкий государственный университет; Под редакцией В.К. Шелега, Н.Н. Попок. - 2018. - С.70-74.
7. Инструмент для поверхностного упрочнения галтелей валов: пат. 2069142 Рос. Федерация: С1 / Паршев С.Н., Дудкина Н.Г., Свитачев А.Ю.; заявл. 17.01.1995; опубл. 20.11.1996.
8. Устройство для чистовой и упрочняющей обработки поверхностей тел вращения сложного профиля: пат. 2493954 Рос. Федерация: С2 / Бутаков Б. И., Шебанин В. С., Бутакова Г. С., Марченко Д. Д.; заявл. 22.11.2010; опубл. 27.09.2013.
9. Способ обработки галтели ступенчатого вала: пат. 2368487 Рос. Федерация: С1 / Гончаров И. Т.; заявл. 15.04.2008; опубл. 27.09.2009.
10. Устройство для накатывания галтелей: Авторское свидетельство №952549, СССР / Улашкин А.П., Фомичев В.В., Даниякин Н.Ф.; заявл. 07.01.1981; опубл. 23.08.1982.
11. Способ упрочнения галтелей: Авторское свидетельство №366063 Рос. Федерация: А1 / Грудская Р.Е., Куликов О.О., Пузылевич С.А.; заявл. 06.04.1971; опубл. 16.01.1973.
12. Способ упрочнения галтелей коренных и шатунных шеек коленчатых валов: Авторское свидетельство №165087, СССР / Маляров Ф. М., Исаев А. И., Силаков Н. И., Лашко Л. А., Пахучий Я. И. и др.; заявл. 02.11.1962; опубл. 04.09.1964.
13. Устройство для упрочнения галтелей коленчатых валов: Авторское свидетельство №210690 СССР / Берштейн Г. Ш., Азаревич Г. М.; заявл. 25.08.1966; опубл. 06.02.1968.
14. Способ упрочнения галтелей валов: авторское свидетельство №1632746 СССР: А1 / Иминов М.У., Егоров В.П., Бабаян А.В.; заявл. 11.01.1988; опубл. 07.03.1991.
15. Сидякин Ю.И., Бочаров Д.А. Повышение циклической прочности галтелей ступенчатых валов обкаткой роликами или шариками // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2009. № 8 (56). С. 37-40.
16. Зайдес С.А. От пластического отпечатка при внедрении рабочего инструмента к созданию новых процессов отделочно-упрочняющей обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2019. - Т. 15. - № 9 (177). - С.399-403.
17. Зайдес С.А., Фам В.А. Повышение качества калиброванной стали поверхностным деформированием. часть 1. Определение напряженного состояния цилиндрических деталей при орбитальном поверхностном деформировании // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2020. - Т. 63. - № 10. - С.802-807.
18. Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя при реверсивном поверхностном пластическом деформировании деталей машин // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2022. - Т. 18. - № 7 (211). - С. 320-327.
19. Отений Я.Н., Лаврентьев А.М. Сравнение различных методов определения глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием // Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2017. - № 9 (204). - С. 50-54.
20. Удалов А.В. Исследование влияния испытательной нагрузки на размерный эффект при измерении твердости материалов сферическим индентором // Черные металлы. - 2020. - № 9. - С. 62-67.

### References

1. Denisov V.A., Slinko D.B. Features of technology for straightening and hardening crankshafts by embossing fillets // Proceedings of GOSNITI. - 2016. - Т. 125. - P. 182-190.
2. Chainov N.D., Suslikov V.V. Strengthening the crankshaft using surface plastic deformation methods // Truck. – 2014. – No. 3. – P.31-35.
3. Emelyanov V.N., Kostin P.V. Computer modeling of the process of warping of spatial crankshafts with five connecting rod journals // Bulletin of the Novgorod State University. - 2013. - No. 75-1. - P.67-74.
4. Zezyulya V.V. Increasing the fatigue strength of shafts with fillet transitions after electrocontact welding with wire // Repair. Recovery. Modernization. - 2014. - No. 5. - P.33-38.
5. Kostichev V.E., Deniskina E.A., Popkov A.A., Vasilenko A.A. Influence of the length of the hardening zone of fillet transitions on high-cycle fatigue of the crankshaft // In the collection: Mathematical modeling and boundary value problems. Proceedings of the tenth All-Russian scientific conference with international participation: in 3 volumes. - 2016. - P.125-128.
6. Zavistovsky S.E., Zavistovsky V.E., Kirienko A.S. Healing of microcracks in the process of pneumodynamic treatment of fillets of crankshaft journals // In the collection: Innovative technologies in mechanical engineering. Electronic collection of materials from the international scientific and technical conference dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University. Polotsk State University; Edited by V.K. Shelega, N.N. Butt. - 2018. - P.70-74.
7. Tool for surface hardening of shaft fillets: Pat. 2069142 Ross. Federation: C1 / Parshev S.N., Dudkina N.G., Svitachev A.Yu.; application 01/17/1995; publ. 11/20/1996.
8. Device for finishing and hardening the surfaces of rotating bodies of complex profile: Pat. 2493954 Ross. Federation: C2 / Butakov B. I., Shebanin V. S., Butakova G. S., Marchenko D. D.; application 11/22/2010; publ. 09/27/2013.
9. Method for processing the fillet of a stepped shaft: Pat. 2368487 Ross. Federation: C1 / Goncharov I. T.; application 04/15/2008; publ. 09/27/2009.
10. Device for rolling fillets: Author's certificate No. 952549, USSR / Ulashkin A.P., Fomichev V.V., Danyakin N.F.; application 01/07/1981; publ. 08/23/1982.
11. Method of strengthening fillets: Author's certificate No. 366063 Ros. Federation: A1 / Grudskaya R.E., Kulikov O.O., Puzylevich S.A.; application 04/06/1971; publ. 01/16/1973.
12. Method of strengthening fillets of main and connecting rod journals: Author's certificate No. 165087, USSR / Malyarov F. M., Isaev A. I., Silakov N. I., Lashko L. A., Pakhuchiy Ya. I. et al. ; application 02.11.1962; publ. 09/04/1964.
13. Device for strengthening crankshaft fillets: Author's certificate No. 210690 USSR / Bershtein G. Sh., Azarevich G., M.; application 08/25/1966; publ. 02/06/1968.
14. Method of strengthening shaft fillets: author's certificate No. 1632746 USSR: A1 / Iminov M.U., Egorov V.P., Babayan A.V.; application 01/11/1988; publ. 03/07/1991.
15. Sidyakin Yu.I., Bocharov D.A. Increasing the cyclic strength of fillets of stepped shafts by rolling in rollers or balls // News of the Volgograd State Technical University. 2009. No. 8 (56). pp. 37-40.
16. Zaides S.A. From plastic imprint when introducing a working tool to the creation of new processes of finishing and strengthening processing // Hardening technologies and coatings. - 2019. - Т. 15. - No. 9 (177). - P.399-403.
17. Zaides S.A., Pham V.A. Improving the quality of calibrated steel by surface deformation. Part 1. Determination of the stress state of cylindrical parts during orbital surface deformation // News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy. - 2020. - Т. 63. - No. 10. - P.802-807.
18. Zaides S.A., Nguyen H.H. Stress-strain state of the surface layer during reverse surface plastic deformation of machine parts // Strengthening technologies and coatings. - 2022. - Т. 18. - No. 7 (211). - pp. 320-327.
19. Oteniy Ya.N., Lavrentyev A.M. Comparison of various methods for determining the depth of hardening when processing parts by surface plastic deformation // News of the Volgograd State Technical University. - 2017. - No. 9 (204). - P. 50-54.
20. Udalov A.V. Study of the influence of test load on the size effect when measuring the hardness of materials with a spherical indenter // Ferrous metals. - 2020. - No. 9. - P. 62-67.

**Информация об авторах**

А.М. Михальченков – доктор технических наук, профессор; Ю.И. Филин - кандидат технических наук; А.А. Тюрева – кандидат технических наук, доцент.

**Information about the authors**

A. Mikhailchenkov - Candidate of Technical Sciences, Professor; Yu. Filin - Candidate of Technical Sciences; A. Tyurneva - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Contribution of the authors:** all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

*The authors declare no conflict of interest.*

Поступила в редакцию (Received): 11.03.2024      Принята к публикации (Accepted): 18.04.2024