

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЛЫХ ВАЛОВ И ОСЕЙ ИЗДЕЛИЙ СЕЛЬХОЗМАШИНОСТРОЕНИЯ

## FORECASTING THE DURABILITY OF HOLLOW SHAFTS AND AXLES OF AGRICULTURAL MACHINERY PRODUCTS

**В.Б. ДЕМЕНТЬЕВ**, д.т.н.

**А.Д. ЗАСЫПКИН**, к.т.н.

Институт механики Уральского отделения РАН, Ижевск, Россия, oka592@rambler.ru

**V.B. DEMENT'EV**, DSc in Engineering

**A.D. ZASYPKIN**, PhD in Engineering

The Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russia, oka592@rambler.ru

Рассмотрены вопросы повышения долговечности при разработке технологий упрочнения ответственных деталей изделий сельхозмашиностроения. Проведенные эксперименты и расчеты показывают, что применение полых осей, валов и других полых изделий дает большой технико-экономический эффект, уменьшает расход металла, облегчает вес оборудования и обеспечивает его высокие эксплуатационные качества. Представлена методика прогнозирования долговечности деталей с термомеханической обработкой и деформацией винтовым обжатием из горячекатаных особо толстостенных труб, проведены их стендовые и эксплуатационные испытания, показавшие, что упрочненные полые детали не только не уступают, а иногда и превосходят сплошные по долговечности. Оптимизация процессов обработки деталей с учетом изложенных результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяет повысить их эффективность. Учитывая, что при этом приходится иметь дело с многофакторными зависимостями, целесообразно автоматизировать их решение. Для ряда технологических процессов разработаны алгоритмы и программы для вычислительной техники, успешно используемые как при автоматизации проектирования технологических процессов, так и при автоматизации самого производства. С применением термомеханической обработки и деформации винтовым обжатием достигнуто на некоторых изделиях (пальцы траков гусеничных машин) пятикратное увеличение долговечности при асимметричном знакопостоянном изгибе. Таким образом, становится очевидной целесообразность значительно более широкого, чем в настоящее время, применения полых осей, валов и других полых деталей в сельхозмашиностроении, если учесть весьма важное свойство указанных полых деталей, заключающееся в том, что они менее чувствительны к концентрации напряжений при циклических нагрузках, в особенности если проведено упрочнение высокотемпературной термомеханической обработкой. Рекомендуется применение этой уникальной обработки ответственных и высоконагруженных деталей машиностроения для широкого спектра их назначения.

**Ключевые слова:** полые валы и оси, долговечность, пальцы траков гусеничных машин, нагрев, деформация, охлаждение, высокотемпературная термомеханическая обработка, показатели качества.

The issues of increasing durability in the development of technologies for strengthening the critical parts of agricultural machinery products are considered. The conducted experiments and calculations show that the use of hollow axes, shafts and other hollow products gives a great technical and economic effect, reduces the consumption of metal, facilitates the weight of equipment and ensures its high performance. The technique of prediction of the durability of parts with thermomechanical processing and deformation by screw compression from hot-rolled especially thick-walled pipes is presented, their bench and operational tests have been carried out, showing that hardened hollow parts not only do not concede, and sometimes exceed continuous durability. Optimization of the processing of parts, taking into account the stated results of theoretical and experimental studies, makes it possible to increase their efficiency. Considering that it is necessary to deal with multifactorial dependencies, it is advisable to automate their solution. Algorithms and programs for computer technology have been developed for a number of technological processes, successfully used both for automating the design of technological processes and for automating production itself. With the use of thermomechanical processing and deformation by screw compression, a fivefold increase in durability with asymmetric sign-constant bending is achieved on some products (track fingers of caterpillar machines). Thus, it becomes evident that the use of hollow axes, shafts and other hollow parts in agricultural machinery construction is much more widespread than at present, given the very important property of these hollow parts, that they are less sensitive to stress concentration under cyclic loads, especially if hardening is performed by high-temperature thermomechanical processing. It is recommended to use this unique treatment of responsible and highly loaded machine parts for a wide range of applications.

**Keywords:** hollow shafts and axles, durability, track fingers of caterpillar machines, heating, deformation, cooling, high-temperature thermomechanical processing, quality indicators.

## Введение

Одной из основных задач, которые стоят в настоящее время перед машиностроителями, является улучшение технических показателей: снижение веса машин и механизмов при повышении их долговечности и надежности.

Проведенные эксперименты и расчеты [1] показывают, что применение полых осей, валов и других полых изделий дает большой технико-экономический эффект, уменьшает расход металла, облегчает вес оборудования и обеспечивает его высокие эксплуатационные качества.

Становится очевидной целесообразность значительно более широкого, чем в настоящее время, применения полых осей, валов и других полых деталей в сельхозмашиностроении, если учесть весьма важное свойство указанных полых деталей, заключающееся в том, что они менее чувствительны к концентрации напряжений при циклических нагрузках, в особенности при упрочнении термомеханической обработкой [2].

Особое значение имеет при рассмотрении вопросов упрочнения методом термомеханической обработки (ТМО) прогнозирование долговечности деталей по величине и уровню показателей их качества, создаваемых в процессе их изготовления (прочности, пластичности, шероховатости поверхности, наличии металлургических дефектов поверхности, способа ее упрочнения и т.п.).

## Применяемые методы исследования

Из сказанного выше следует, что рассматривая методы повышения усталостной прочности, износостойкости и долговечности полых осей и валов, полезно осветить с достаточной полнотой рациональную технологию упрочнения полых деталей методами ТМО металла и применение методов прогнозирования долговечности деталей при наработке определенного (требуемого конструктором) количества циклов нагружения [3].

Все детали после любого метода формообразования имеют на своих поверхностях шероховатость, волнистость и микронеровности, что приводит к дискретному характеру соприкосновения. В результате фактическая площадь, через которую передается давление от одной поверхности к другой, составляет малую часть номинальной площади касания, ограниченной внешними размерами соприкасающихся тел и являющихся основой для проектно-

конструкторских разработок [4]. Это приводит к наибольшим контактным деформациям со всеми вытекающими последствиями. Следовательно, на контактную жесткость и другие эксплуатационные показатели контактирующих деталей прежде всего влияют геометрические характеристики качества поверхности, а они, в свою очередь, зависят от условий выполнения технологических операций.

Технологическое обеспечение шероховатости поверхности часто базируется лишь на экспериментальных зависимостях между методами окончательной обработки и шероховатостью поверхности [5]. Достижимая при том или ином методе обработки шероховатость поверхности прежде всего характеризуется значениями высотных параметров  $R_a$ ,  $R_z$  или  $R_{max}$ . Однако, как показали экспериментальные исследования и теоретические решения контактных задач с учетом состояния реальных поверхностей, этих характеристик недостаточно, так как поверхности с одинаковой высотой неровностей, но полученные различными технологическими методами, могут иметь различные эксплуатационные свойства [6, 7]. В этом случае, кроме высотных параметров шероховатости, ГОСТом 2789-73 предусмотрены шаговые параметры шероховатости ( $S_m$  и  $S$ ), а также параметр, связанный с формой микронеровностей,  $t_o$ , а они, в свою очередь, зависят от качества инструмента, его формы и других технологических параметров процесса формирования поверхности заготовки.

Процесс контактирования поверхностей, имеющих не только шероховатость и волнистость, но и микронеровности, в значительной степени определяется формой и размерами последних. Для оценки этого влияния следует учитывать не только предельные значения отклонений от правильной геометрической формы, регламентируемые ГОСТ 632-80, но и располагать законом изменения отклонений по всей номинальной площади деталей. Это связано с тем, что при одинаковой степени отклонения от правильной геометрической формы, но при различной геометрической характеристике этих отклонений (выпуклая, вогнутая, отклонения в одной плоскости, в двух плоскостях, закономерность изменения зазора при соединении деталей с определенными взаимными расположениями и формой микронеровностей и т.д.) соединения будут иметь различные эксплуатационные свойства [6]. Так, при

различной пространственной ориентации минимальной и максимальной толщины стенки трубы при асимметричном изгибе получают различные величины долговечности (число циклов до разрушения при одинаковом напряжении цикла).

На величину и форму макронеровностей и на точность обработки решающее влияние оказывают условия выполнения технологического процесса: упругие и температурные деформации технологической системы, размерный износ инструмента и другие условия протекания процессов, которые успешно исследуются и уже имеются значительные успехи в практическом применении результатов этих исследований [7].

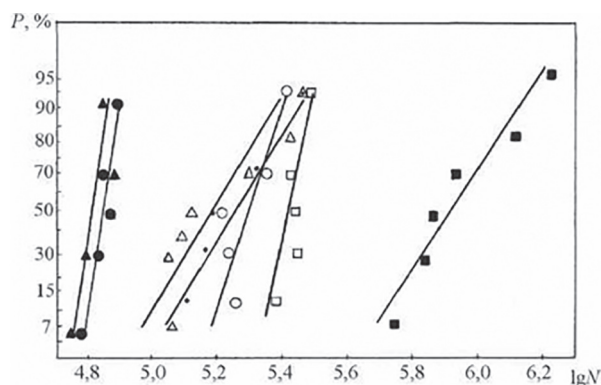
В настоящее время задача технологического обеспечения качества поверхности решается при условии, что технологу в большинстве случаев предоставлена возможность выбора технологического процесса и метода обработки, обеспечивающих лишь заданные конструктором значения шероховатости и точности. Только в отдельных случаях конструктор указывает кроме высотного параметра шероховатости дополнительные требования, например метод окончательной обработки поверхности.

Характерно, что при этом практически не учитывается изменение большинства геометрических характеристик рабочих поверхностей, и в результате такой выбор методов обработки далеко не всегда дает положительные результаты [4].

### Основные результаты исследований

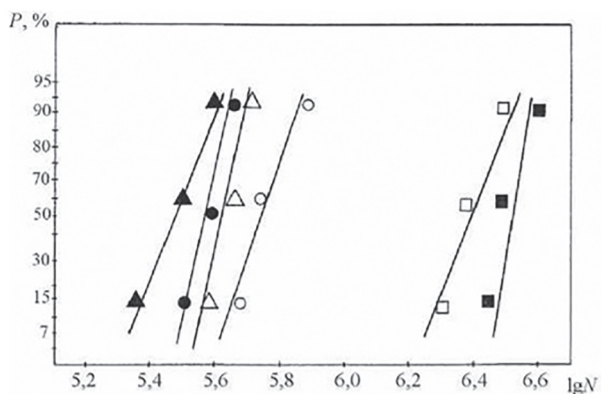
Одним из методов улучшения показателей качества изделий машиностроения является применение в технологическом процессе высокотемпературной термомеханической обработки, которая включает непрерывно-последовательный нагрев, деформацию и охлаждение заготовок [2, 3, 5].

На рис. 1 показано распределение долговечности полых пальцев траков гусеничных машин, изготовленных с применением ТМО различными методами, но с одинаковой шероховатостью наружной и внутренней поверхности ( $R_z \leq 10$  мкм) в координатах: логарифм долговечности  $\lg N$  – вероятность  $P$ . На рис. 2 представлена долговечность в зависимости от схемы обработки, определяющей параметры качества поверхностей детали как функцию технологических факторов  $\Delta S, H, \lambda$ .



**Рис. 1. Характер распределения значений долговечности пальцев:** • – 38ХС, изотермическая закалка плюс обкатка; ◐ – 38ХС, ТМО; Δ – 30ХГСН2А, ТМО плюс обкатка; ▲ – 30ХГСН2А, закалка плюс обкатка; ◊ – 30ХГСН2А, закалка плюс отпуск; ◑ – 30ХГСН2А, закалка плюс отпуск плюс обкатка; ◒ – 30ХГСН2А, ТМО; ■ – 30ХГСН2А, ТМО плюс обкатка

Разброс долговечности для каждой марки стали связан не только с различием методов упрочнения, но и с различием получаемых характеристик качества трубных заготовок. Поэтому показанные на рис. 2 результаты испытаний, включающие наряду с высотой макронеровностей  $R_{max}$  параметры разностенности (точности)  $\Delta S$  и степени деформации  $\lambda$  при термомеханической обработке и деформацией винтовым обжатием (ТМО ВО) (косвенно характеризует прочность материала детали), дают более полную и точную картину взаимосвязи технологических факторов с эксплуатационными свойствами.



**Рис. 2. Долговечность  $N$  в зависимости от технологических факторов ( $\Delta S, H, \lambda$ ), полученных при испытании пальцев из стали 30ХГСН2А по схемам:** ▲ – ТМО на длинной оправке; ◐ – ТМО на короткой оправке; Δ – расшероховывание плюс ТМО на длинной оправке; ◊ – расшероховывание плюс ТМО на короткой оправке; ◑ – ТМО на длинной оправке плюс зачистка отверстия абразивом; ■ – ТМО на короткой оправке плюс зачистка отверстия абразивом

При обработке данных эксперимента (рис. 2 и табл. 1) по методике построения аппроксимационных математических моделей определена следующая зависимость:

$$N = A_0 + A_1 \text{EXP}(-(\Delta S^2 + H^2 + (\lambda - 30)^2) / 300),$$

где  $A_0 = -285,72$  и  $A_1 = 2290,34$  – расчетные коэффициенты;  $\Delta S$  – разностенность в сечении полого пальца в точке приложения максимального изгибающего момента;  $H$  – шероховатость внутренней поверхности в месте зарождения усталостной трещины;  $\lambda$  – логарифмическая степень деформации.

Графическое изображение полученной модели показано на рис. 3.

Для выяснения зависимости долговечности от перечисленных факторов был проведен специальный эксперимент по ранее описанной в литературе методике [6]. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Полученная модель позволяет прогнозировать эксплуатационные свойства (долговечность) готовых деталей, изготовленных по определенной схеме обработки в зависимости от качественных характеристик поверхности заготовок и режимов упрочняющей (окончательной) обработки (ТМО), что позволяет, в свою очередь, определить оптимальный вариант их изготовления [8].

На основании проведенных исследований по определению взаимосвязи качества трубных заготовок и эксплуатационной долговечности изготовленных из них полых валов и осей появляется возможность определить наиболее эффективный вариант технологического маршрута их изготовления [9].

По результатам предварительных стендовых испытаний полых пальцев с различными

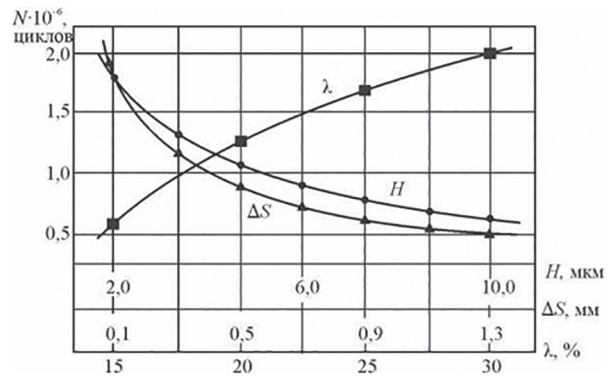


Рис. 3. Влияние шероховатости  $H$ , разностенности  $\Delta S$  и степени деформации  $\lambda$  на долговечность полых пальцев при асимметричном знакопостоянном изгибе

видами подготовки внутренней поверхности (табл. 2) можно утверждать, что удаление дефектного слоя с поверхности отверстия положительно сказывается на долговечности детали. Вместе с тем, определенное значение имеют качество механической обработки (шероховатость  $H$ ) и способ деформации при ТМО (на короткой или длинной оправках). Так, в опытах 1, 3, 5 наблюдается снижение величины  $N$  от 1-го к 3-му опыту. Это связано с наличием у заготовок, изготовленных по варианту 3 следов от рассверливания, которые остаются и после деформации. При этом, деформация на короткой оправке позволяет несколько снизить высоту следа от режущего инструмента (см. опыт 3, 4).

Средняя степень деформации  $\lambda$  определялась с учетом разброса величины внутреннего диаметра заготовки пальца перед ТМО.

Зачистка отверстия абразивом после ТМО вносит значительный вклад в повышение долговечности. В работе Нестеренко И.И. [10] показано влияние абразивной обработки на

Таблица 1

Результаты стендовых испытаний пальцев с варьированием параметров  $\Delta S$ ,  $H$  и  $\lambda$

Число циклов до разрушения, $N \cdot 10^{-3}$ циклов	Разностенность, $\Delta S$ , мм	Шероховатость внутренней поверхности, $H$ , мкм	Степень деформации при ТМО ВО, $\lambda$ , %
$\geq 2000$	0,10	1,9	30
1747	0,15	2,5	37
1190	0,33	4,7	20
888	0,53	5,9	19
780	0,69	6,6	43
697	0,81	7,9	17
692	0,85	8,2	45
590	1,20	10,0	15



Таблица 2

## Результаты предварительных стендовых испытаний полых пальцев с различными видами обработки

№ опыта	Вид обработки	Шероховатость внутренней поверхности готовой детали, $H$ , мкм	Разностенность в месте разрушения, $\Delta S$ , мм	Степень деформации при ТМО ВО, $\lambda$ , %	Диаметр отверстия до деформации, $d^{+0,2}$ , мм	Долговечность $N \cdot 10^{-3}$ , циклов
1	ТМО на длинной оправке	1,9–2,2	0,30	26,4	11	421
2	ТМО на короткой оправке	0,4–0,7	0,15	26,4	11	306
3	Рассверливание отверстия до ТМО + 1	4,2–4,6	0,30	16,9	13	335
4	Рассверливание отверстия до ТМО + 2	3,3–3,8	0,25	22,0	12	531
5	3 + зачистка отверстия абразивом после ТМО	1,6–1,8	0,35	22,0	12	24731
6	4 + зачистка отверстия абразивом после ТМО	0,6–0,8	0,15	16,9	13	$\geq 3000$

усталостную прочность материала, однако эффективность влияния абразивной обработки отверстия на долговечность полых деталей, работающих в условиях асимметричного знакопостоянного изгибного нагружения, еще недостаточно изучена. Так, дополнительная пескоструйная обработка труб размером 57Ч13 мм в течение 3 мин (после расточки) позволила уменьшить глубину дефектов до 0,1 мм. Положительное влияние пескоструйной (гидроабразивной) обработки [11] объясняется, главным образом, значительным дополнительным упрочнением внутреннего слоя металла глубиной до 0,07 мм, что препятствует складкообразованию.

Результаты проведенных исследований позволяют качественно оценить влияние рассмотренных факторов ( $H$ ,  $\Delta S$ ,  $\lambda$ ) на долговечность детали. На рис. 3 представлены графики зависимости  $N = f(H, \Delta S, \lambda)$  для каждого аргумента.

Формула  $N = f(H, \Delta S, \lambda)$  позволяет производить расчеты необходимой точности поставляемых заготовок (по величине  $\Delta S$ ), шероховатости поверхности (выбор способа механической обработки) и оптимальной степени деформации (при  $\lambda = 30$  % получается наиболее благоприятное сочетание механических свойств материала детали) для обеспечения заданного уровня долговечности изделия.

В свою очередь, степень деформации  $\lambda$  в модели  $N = f(H, \Delta S, \lambda)$  определяется разбросом величины диаметра отверстия заготовки под ТМО ВО. Поэтому из зависимости  $N = f(\lambda)$  можно получить допуск на размер  $d$  с заранее заданной величиной  $N$  (рис. 4.)

Таким образом, решение модели  $N = f(H, \Delta S, \lambda)$  дает возможность получения данных (допуски на величины  $\Delta S$ ,  $d$ ,  $H$ ) для разработки технических условий поставки толстостенных полых заготовок под ТМО ВО для обеспечения заданной долговечности изделий.

Так, например, при рассмотрении частного случая определения допуска на разностенность задаются требуемой величиной  $N = 3 \cdot 10^6$  циклов. По оптимальной величине  $\lambda = 30$  % и шероховатости поверхности, получаемой после зачистки отверстия абразивом после ТМО и предварительного рассверливания ( $H = 1,0$  ч 1,8 мкм), путем подстановки фиксированных величин в формулу для  $N$  следует, что величина разностенности  $\Delta S$  получаемых в металлургическом цикле трубных заготовок не должна превышать 1,4 мм.

Известно, что эксплуатационные показатели зависят не только от геометрических характеристик поверхностей, но и от физико-меха-

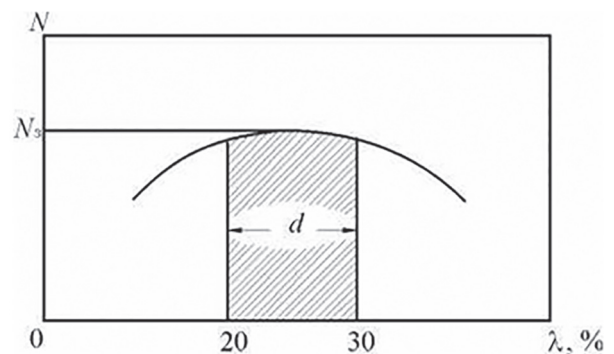


Рис. 4. Величина разброса степени деформации  $\lambda$  (зависит от величины поля отклонений внутреннего диаметра трубы  $d$ ), определяющая заданную величину долговечности  $N_s$

нических свойств металла. Существует много методов, позволяющих эффективно управлять указанными характеристиками: термическая обработка, ТМО, высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМ), поверхностное пластическое деформирование (ППД), электромеханическая обработка, наплавка и напыление покрытий и т.д. [7].

Таким образом, многие характеристики качества поверхности, влияющие на эксплуатационные свойства, зависят от технологического метода и условий изготовления деталей. Определив, что каждому технологическому методу обработки соответствуют достижимые количественные и качественные характеристики (высота неровностей, шаг, размеры закругления вершин, направление неровностей, степень и глубина наклепа и т.д.), становится возможным технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами деталей. Исходя, например, из заданной величины износостойкости или усталостной прочности, можно определить условия изготовления – метод, режимы и др. [8–9]. Для ряда технологических процессов установлены зависимости, связывающие условия обработки с качеством поверхности. Они обобщают экспериментальные и теоретические исследования и позволяют назначать режимы обработки, обеспечивающие с учетом технологической наследственности заданные параметры качества – высоту и форму неровностей, опорную площадь и т.д. Это позволяет контроль отдельных параметров качества поверхности заменить контролем условий обработки: степени деформации, подачи, скорости резания, жесткости технологической системы. Таким образом, усиливается контроль за режимами и параметрами технологического процесса, соблюдением технологической дисциплины [7].

Вместе с тем, оптимизация процессов обработки деталей с учетом изложенных результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяет повысить их эффективность. Учитывая, что при этом приходится иметь дело с многофакторными зависимостями, целесообразно автоматизировать их решение: для ряда технологических процессов разработаны алгоритмы и программы для вычислительной техники [8–9], успешно используемые как при автоматизации проектирования технологических процессов, так и при автоматизации самого производства.

## Заключение

Разработана методика прогнозирования долговечности деталей типа полый цилиндр, работающих в условиях асимметричного знакопостоянного изгибного нагружения. В основу метода положено задание величины показателей качества деталей, которые и определяют впоследствии окончательную величину долговечности. Рассмотрены вопросы повышения долговечности при разработке технологий упрочнения ответственных деталей изделий сельскохозяйственного машиностроения.

## Литература

1. Школьник Л.М., Коваленко Ю.Е., Мартынов Н.И., Усова Л.А. Полые оси и валы. М.: Машиностроение, 1968. 183 с.
2. Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д. Влияние остаточных напряжений на точность полых пальцев траков гусеницы при ВТМО с деформацией винтовым обжатием // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 12. С. 52–54.
3. Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д. Конверсионная технология изготовления пальцев гусеницы // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 11. С. 48–51.
4. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 223 с.
5. Засыпкин А.Д., Дементьев В.Б., Стерхов М.Ю., Чуркин А.В. Шероховатость внутренней поверхности полых пальцев и их долговечность при асимметричном знакопостоянном изгибе // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 11. С. 46–48.
6. Дементьев В.Б., Шаврин О.И., Маслов Л.Н., Засыпкин А.Д. Качество пальцев траков – основа надежности и долговечности гусеницы. Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2009. 224 с.
7. Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д. Теория и практика обработки глубоких отверстий в горячекатаной трубной заготовке. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. 175 с.
8. Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д. Системный анализ процесса высокотемпературной термомеханической обработки заготовок полых пальцев гусеничной ленты // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 11. 2015. С. 30–34.
9. Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д. Определение критериев оптимальности при разработке упрочняющих технологий // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 12. С. 29–33.
10. Нестеренко И.М. Повышение усталостной прочности стали после гидроабразивной обработки.

М.: Ред. Журнала «Хим. и нефт. машиностр.», 1988. 5 с.

11. Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д., Трухачев А.В. Устройство для гидроабразивной обработки внутренних поверхностей труб. А.с. 1569208 (СССР). Опубликовано 07.06.90. Бюл. У 21 (71).

## References

1. Shkol'nik L.M., Kovalenko Yu.E., Martynov N.I., Usova L.A. Polye osi i valy [Hollow axis and shafts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. 183 p.
2. Dement'ev V.B., Zasyppkin A.D. Effect of residual stresses on the accuracy of the hollow fingers of the caterpillar tracks under high-temperature thermomechanical processing with deformation by screw compression. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2012. No 12, pp. 52–54.
3. Dement'ev V.B., Zasyppkin A.D. Conversion technology of manufacturing of caterpillars. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2013. No 11, pp. 48–51.
4. Dal'skiy A.M. Tekhnologicheskoe obespechenie nadezhnosti vysokotochnykh detaley mashin [Technological support of reliability of high-precision machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 223 p.
5. Zasyppkin A.D., Dement'ev V.B., Sterkhov M.Yu., Churkin A.V. Roughness of the inner surface of the hollow fingers and their durability with asymmetric sign-constant bending. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2011. No 11, pp. 46–48.
6. Dement'ev V.B., Shavrin O.I., Maslov L.N., Zasyppkin A.D. Kachestvo pal'tsev trakov – osnova nadezhnosti i dolgovechnosti gusenitsy [The quality of the fingers of the tracks is the basis for the reliability and durability of the track]. Izhevsk: IPM UrO RAN Publ., 2009. 224 p.
7. Dement'ev V.B., Zasyppkin A.D. Teoriya i praktika obrabotki glubokikh otverstiy v goryachekatanoy trubnoy zagotovke [Theory and practice of deep hole processing in hot-rolled pipe billet]. Perm': Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta Publ., 2014. 175 p.
8. Dement'ev V.B., Zasyppkin A.D. System analysis of the process of high-temperature thermomechanical processing of blanks of caterpillar tapes. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. No 11, pp. 30–34.
9. Dement'ev V.B., Zasyppkin A.D. Determination of optimality criteria in the development of strengthening technologies. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. No 12, pp. 29–33.
10. Nesterenko I.M. Povyshenie ustalostnoy prochnosti stali posle gidroabrazivnoy obrabotki [Increased fatigue strength of steel after hydroabrasive treatment]. Moscow: Red. Zhurnala «Khim. i nef. mashinostr.» Publ., 1988. 5 p.
11. Dement'ev V.B., Zasyppkin A.D., Trukhachev A.V. Ustroystvo dlya gidroabrazivnoy obrabotki vnutrennikh poverkhnostey trub [A device for hydroabrasive treatment of internal surfaces of pipes]. А.с. 1569208 (SSSR). Опубликовано 07.06.90. Бюл. У 21 (71).