

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 621.787

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-19-29

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБКАТЫВАНИИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Учайкин Сергей Евгеньевич

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

для корреспонденции: uchaikinse@kuzstu.ru

### Аннотация.

Выполнено исследование формирования очага деформации в процессе обкатывания сложнопрофильных валов, используемых в различных изделиях в разных отраслях промышленности. Конструктивные элементы, такие как шпоночные и шлицевые пазы, галтельные переходы между ступенями, проточки, резьбы и др., являются концентраторами напряжений, которые отрицательно влияют на эксплуатационные свойства деталей. В большинстве случаев валы подвержены воздействию циклических знакопеременных нагрузок, поэтому снижение влияния концентраторов является актуальной задачей. Анализ показал, что поверхностное пластическое деформирование (ППД) обкатыванием роликами позволяет существенно увеличить циклическую долговечность за счет снижения шероховатости поверхности детали до  $Ra\ 0,4...0,02$  с получением упрочнения глубиной до 10 мм при степени упрочнения до 20...50%. Показано, что установленные ранее закономерности формирования поверхностного слоя, присущие обработке цилиндрических поверхностей, при обработке переходных поверхностей работают не в полной мере. В этом случае в процессе обработки формируется нестационарный очаг деформации, который свидетельствует о формировании неравномерного поверхностного слоя, что, безусловно, сказывается на циклических свойствах материала данного изделия. На взгляд автора, для обеспечения большей циклической долговечности необходимо добиться стационарного очага деформации в процессе обработки обкатыванием. Для этого были выполнены исследования влияния схемы обкатывания, геометрии сложнопрофильной поверхности и натяга на формирование напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации и упрочненном поверхностном слое детали. В результате моделирования контактных задач обкатывания в программном продукте Ansys исследовано влияние на формирование напряженно-деформированного состояния: двух предложенных схем обкатывания переходных поверхностей; сложнопрофильной геометрии поверхности детали, содержащей и не содержащей участки, образованные пересечением образующих геометрических элементов и переменного натяга деформирующего инструмента. Результаты исследований показали возможность достижения стационарного/квазистационарного очага деформации за счет сочетания анализируемых технологических факторов.



### Информация о статье

Поступила:

02 сентября 2024 г.

Одобрена после рецензирования:

29 сентября 2024 г.

Принята к публикации:

10 октября 2024 г.

Опубликована:

24 октября 2024 г.

### Ключевые слова:

сложнопрофильные валы, поверхностное пластическое деформирование, обкатывание, технологические факторы, стационарный/квазистационарный очаг деформации, МКЭ моделирование, напряженно-деформированное состояние

**Для цитирования:** Учайкин С. Е. Влияние технологических факторов на формирование очага деформации при обкатывании сложнопрофильных поверхностей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 5 (165). С. 19-29. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-19-29, EDN: DZJODT

### Введение.

Сложнопрофильные валы являются одними из основных компонентов большинства редукторов, используемых в разных отраслях промышленности. В процессе эксплуатации валы испытывают статические и/или циклические знакопеременные нагрузки.

Различные геометрические элементы валов, такие как шпоночные и шлицевые пазы, галтельные переходы между ступенями, проточки, резьбы и др., являются концентраторами напряжений, которые отрицательно влияют на статические и циклические свойства данных деталей.

Минимизировать влияние концентраторов позволяют упрочняющие методы обработки. Одним из доступных методов, не требующих

дорогостоящего оборудования и оснастки, позволяющих существенно увеличить циклическую долговечность, является поверхностное пластическое деформирование (ППД) [1-2]. Обкатывание роликами или шариками позволяет существенно снизить шероховатость поверхности детали до  $Ra\ 0,4...0,02$  с получением упрочнения глубиной до 10 мм при степени упрочнения до 20...50% в зависимости от совокупности технологических факторов.

Процесс обкатывания цилиндрических поверхностей подробно исследован во многих работах, в том числе в работах [1-4]. В результате обкатывания поверхности торovým роликом спустя несколько оборотов детали процесс обработки стабилизируется и сохраняется на протяжении всей обработки.

На Рис. 1 представлена схема профиля очага деформации (ОД) 3-го вида в осевом сечении вала, в котором расположена плоскость главных деформаций. Подобный ОД возникает при наиболее распространенных режимах ППД. Одним из характерных геометрических элементов ОД является пластическая волна, которая возникает перед деформирующим инструментом в зоне контакта последнего с поверхностью детали.

В рамках рассматриваемой модели очаг деформации описывается совокупностью контактных и внеконтактных поверхностей:  $ABC$  – передняя внеконтактная область;  $CDE$  – контактная область;  $EF$  – задняя внеконтактная область. Передняя внеконтактная область в свою очередь состоит из вогнутого участка  $AB$  и выпуклого участка  $BC$ .

В процессе обкатывания ОД за один оборот детали смещается на величину подачи  $S_z$  с сохранением формы и размеров.

При обработке переходных поверхностей закономерности формирования поверхностного слоя (ПС), присущие обработке цилиндрических поверхностей, работают не в полной мере: в процессе обработки возникает нестационарность ОД [5-8]. Данное явление заключается в том, что контур очага деформации, в т. ч. геометрия пластической волны, на разных участках криволинейной поверхности имеет разные формы и размеры. Это свидетельствует о формировании неравномерного поверхностного слоя, что безусловно сказывается на циклических свойствах

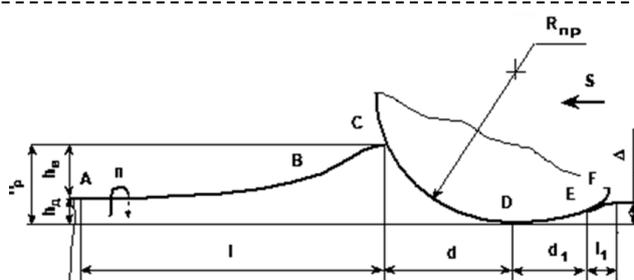


Рис. 1. Профиль очага деформации 3 вида в плоскости подачи

Fig. 1. Profile of the deformation zone of type 3 in the feed plane

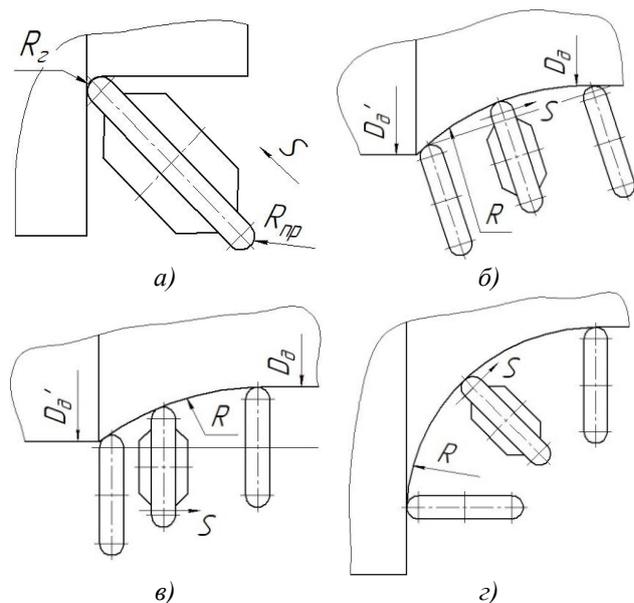


Рис. 2. Схемы обкатывания галтелей

Fig. 2. Schemes for rolling fillets

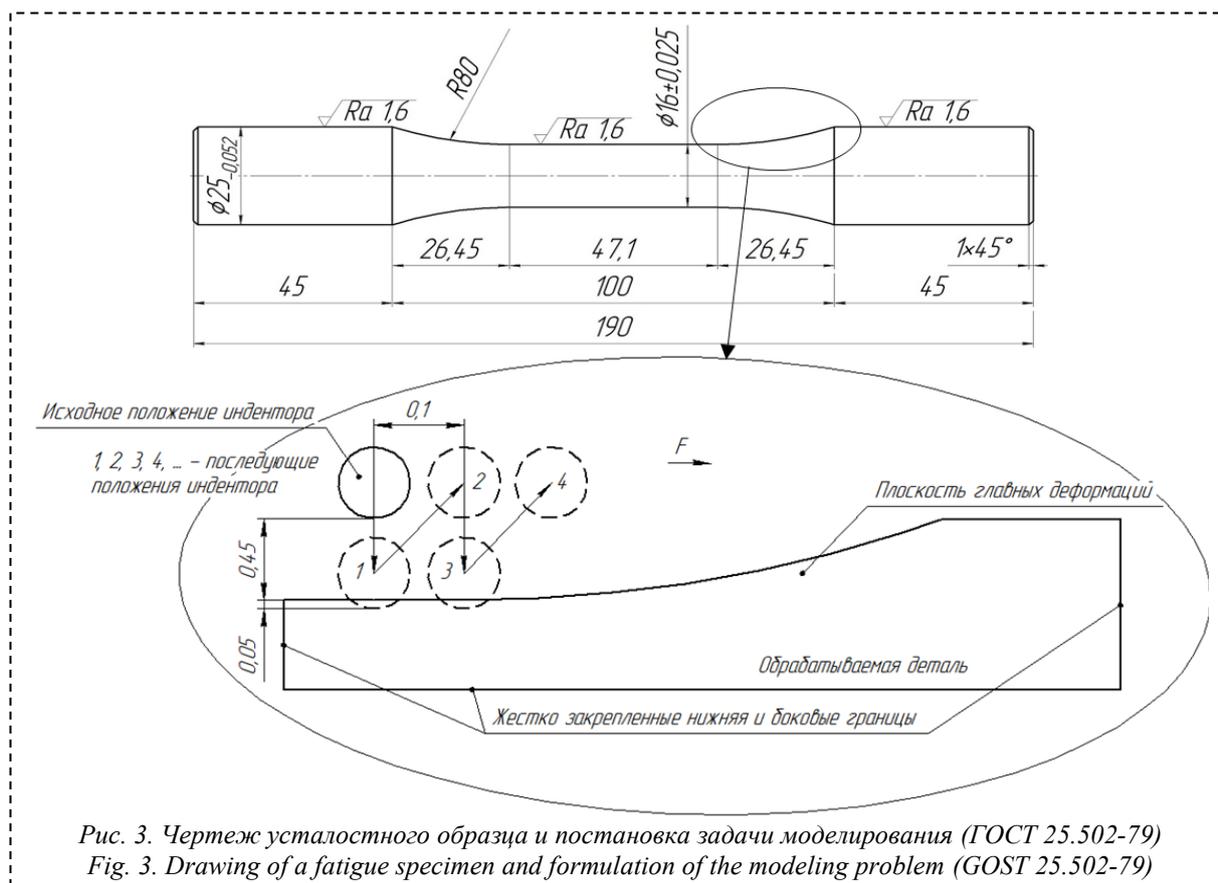


Рис. 3. Чертеж усталостного образца и постановка задачи моделирования (ГОСТ 25.502-79)  
Fig. 3. Drawing of a fatigue specimen and formulation of the modeling problem (GOST 25.502-79)

материала данного изделия.

Анализ научной литературы показал, что наиболее распространенными схемами обкатывания переходных поверхностей являются: обкатывание роликом с радиусом, равным радиусу галтели (Рис. 2а); обкатывание роликом с подачей по хорде (Рис. 2б); обкатывание роликом с подачей по оси вала (Рис. 2в); обкатывание роликом с подачей по дуге образующей переходной поверхности (Рис. 2г) [9-11]. При этом схема на Рис. 2г является предпочтительной, т. к. вектор прикладываемого усилия всегда направлен перпендикулярно оси вращения ролика и перпендикулярно касательной образующей криволинейного профиля поверхности, что позволяет в сочетании с другими технологическими факторами формировать квазистационарный ОД.

Процессы, протекающие в поверхностном слое деталей при обкатывании, можно описать на феноменологическом уровне с использованием основных положений механики деформируемых сред [3]. При этом решается краевая задача теории пластичности, исследуется напряженно-деформируемое состояние (НДС) очага деформации, выполняется расчет таких параметров, как степень деформации сдвига, степень исчерпания запаса пластичности, тензор остаточных напряжений и других. Данные параметры позволяют не только выявить закономерности пластического течения металла, но и выполнить расчеты качества

поверхностного слоя с оценкой циклической долговечности.

Для расчета механического состояния поверхностного слоя детали важным является наличие информации, позволяющей сформировать требуемую совокупность начальных и граничных условий решения задачи [4].

К начальным условиям относят условия на контакте, значения напряжений на передней внеконтактной границе очага деформации, глубину упрочнения, распределение твердости в очаге деформации и по глубине поверхностного слоя, физико-механические свойства материала и другие.

В качестве граничных условий принимаются геометрические высотные и осевые параметры симметричного или асимметричного очага деформации, условия на контакте и другие.

Традиционное представление о формировании НДС в ПС позволяет прогнозировать циклическую долговечность. Однако для переходных поверхностей такие закономерности в полной мере еще не установлены.

Для решения подобных аналитических задач часто применяется метод конечных элементов (МКЭ) [12]. Используя данный метод, можно с высокой достоверностью получить информацию о напряженно-деформированном состоянии поверхностного слоя детали в каждый момент времени обработки.

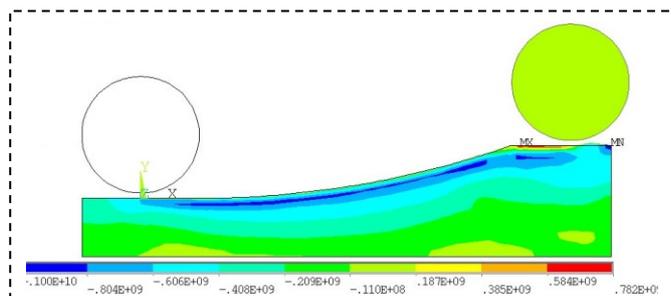


Рис. 4. Эюра распределения компонента напряжения  $\sigma_x$  на последнем шаге моделирования  
 Fig. 4. Distribution diagram of the stress component  $\sigma_x$  at the last step of modeling

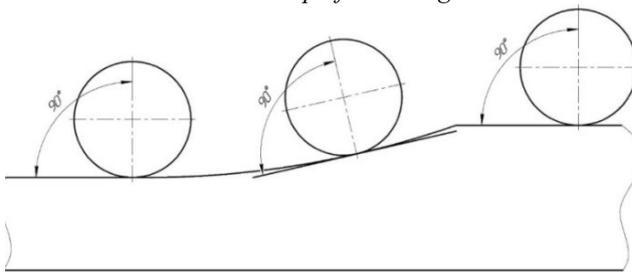


Рис. 5. Новая постановка задачи  
 Fig. 5. New formulation of the problem

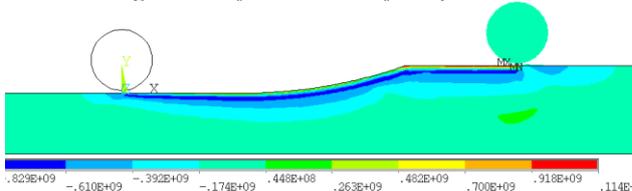


Рис. 6. Распределение осевого компонента  $\sigma_x$   
 Fig. 6. Distribution of the axial component  $\sigma_x$

Как было отмечено выше, в процессе эксплуатации валы испытывают циклические знакопеременные нагрузки. Поэтому в данной работе ключевое внимание уделено оценке осевого компонента  $\sigma_x$ , который главным образом влияет на циклическую долговечность в условиях приложения знакопеременных нагрузок [13].

На взгляд автора, одинаковые или близкие по значению ОН в каждом сечении ПС обеспечат большую циклическую долговечность, чем неравномерное распределение ОН. Поэтому для обеспечения равномерных ОН в ПС необходимо добиться стационарного ОД в процессе обработки поверхность пластическим деформированием.

Целью данной работы является определение закономерностей влияния технологических факторов на формирование стационарного ОД при моделировании обкатывания сложнопрофильных поверхностей.

Для достижения данной цели выполнялось исследование влияния:

- схемы обкатывания;
- геометрии сложнопрофильной поверхности;
- натяга.

#### Влияние схемы обкатывания.

На данном этапе исследований были рассмотрены две схемы обработки поверхности: обкатывание роликом с подачей по оси вала (Рис. 2б) и обкатывание роликом с подачей по дуге образующей переходной поверхности (Рис. 2с).

Для решения задач методом МКЭ за основу принята постановка, которую предложил Махалов М. С. [14-16]. Моделирование выполнялось в программном продукте ANSYS. Для использования максимальной мощности вычислительной машины решение задач проводилось в плоской постановке. Этот способ требует меньших ресурсов ЭВМ, при этом позволяет получить результаты с достоверной точностью [17-18].

В качестве обрабатываемой поверхности моделировался галтельный переход испытуемого образца (Рис. 3.) Нижняя и боковые части фрагмента жестко закреплялись по обеим осям. Индентор моделировался как абсолютно жесткое тело и представлял собой окружность, моделирующую ролик с профильным радиусом  $R_{пр} = 5$  мм. Свойства материала задавались согласно ГОСТ 1050-2013.

В исходном положении индентор находился относительно поверхности с зазором 0,45 мм. На первом и любом последующем нечетном шаге моделирования осуществлялось нагружение – перемещение индентора в направлении поверхности на 0,5 мм, тем самым обеспечивая натяг 0,05 мм. При этом подразумевается схема качения, имитирующая процесс обкатывания.

На втором и любом последующем четном шаге моделирования осуществлялась разгрузка – отвод индентора от поверхности на 0,5 мм с его одновременным перемещением вдоль поверхности в направлении подачи  $F$  на расстояние 0,1 мм (аналогично подаче 0,1 мм/об).

Решение задачи по схеме в на Рис. 2 состояло из 734 шагов – 367 шагов нагружения и 367 шагов разгрузки. Длина обработанной поверхности в представленной модели составила 5 мм до начала галтели, 26.4528 мм галтель и 5 мм после галтели. Общая длина обработки – 36.4528 мм. Результаты распределения осевого компонента  $\sigma_x$  на последнем шаге моделирования представлены на Рис. 4.

На протяжении всей обработанной поверхности на некоторой глубине наблюдается слой со сжимающими напряжениями -600...-800 МПа, с участками до -1000 МПа. На границе переходного участка между галтелью и диаметром 25 мм отмечается неравномерность распределения осевого компонента, что может

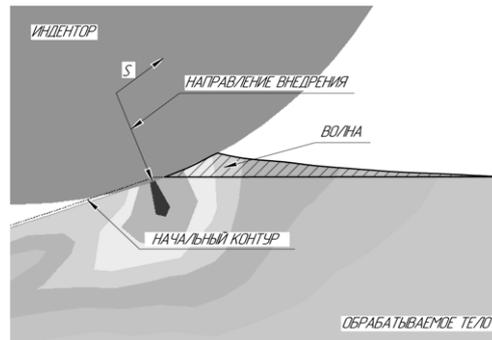


Рис. 7. Последний шаг обработки переходной поверхности  
 Fig. 7. The last step of processing the transition surface

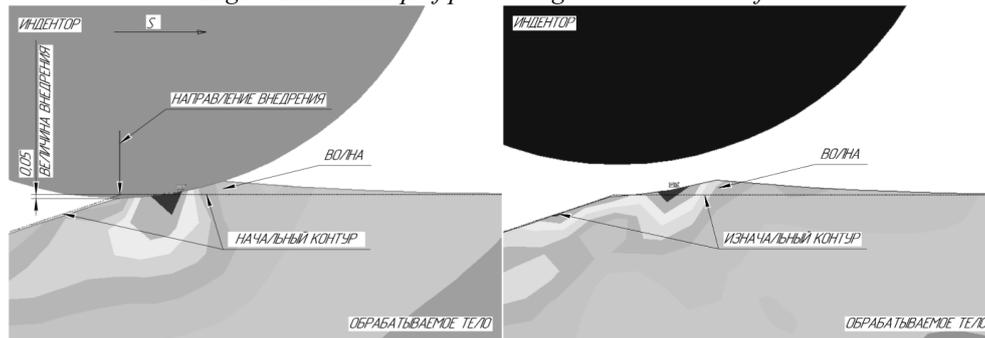


Рис. 8. Первый шаг обработки цилиндрического участка  
 Fig. 8. The first step of processing a cylindrical section

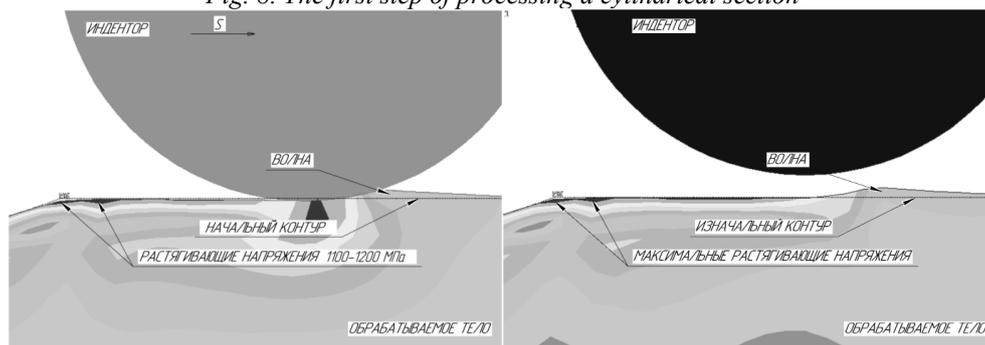


Рис. 9. Последний шаг обработки цилиндрического участка  
 Fig. 9. The last step of processing the cylindrical section

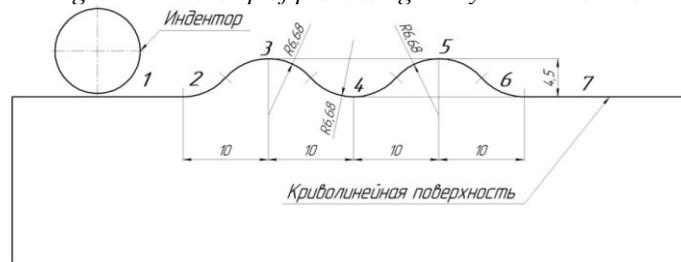


Рис. 10. Профиль обрабатываемой поверхности  
 Fig. 10. Profile of the surface to be processed

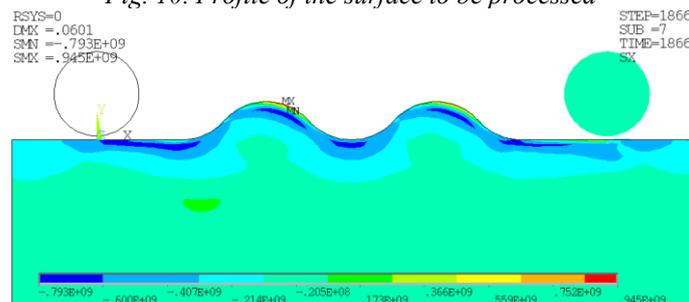


Рис. 11. Распределение осевого компонента  $\sigma_x$  на последнем шаге моделирования  
 Fig. 11. Distribution of the axial component  $\sigma_x$  at the last step of the simulation

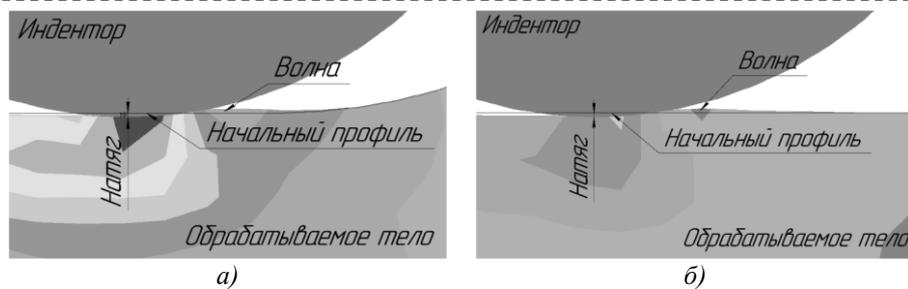


Рис. 12. Формы и размеры очага деформации на прямолинейных участках:  
а – 1-й участок; б – 7-й участок

Fig. 12. Shapes and sizes of the deformation zone on straight sections:  
a – 1st section; b – 7th section

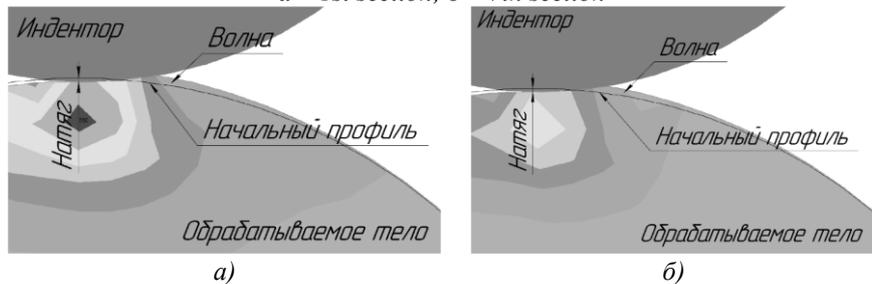


Рис. 13. Формы и размеры очага деформации на выпуклых участках:  
а – 3-й участок; б – 5-й участок

Fig. 13. Shapes and sizes of the deformation zone on convex sections:  
a – 3rd section; b – 5th section



Рис. 14. Формы и размеры очага деформации на вогнутом участке  
Fig. 14. Shapes and sizes of the deformation zone in the concave section

говорить о нестационарности пластического течения. Также отмечается формирование растягивающих напряжений на диаметре 25 мм – до 780 МПа.

На взгляд автора, причиной нарушения квазистационарного течения является совокупность обрабатываемой геометрии поверхности в виде угла, образованного пересечением геометрических элементов галтели и диаметра 25 мм, и стандартных режимов и схемы обработки. Предварительно можно отметить, что при обработке именно таких участков требуется корректировка технологических факторов обработки.

Поэтому на следующем этапе было выполнено моделирование, суть которого заключалась в том, что внедрение индентора осуществлялось перпендикулярно касательной профиля поверхности в каждый момент времени (Рис. 2г, Рис. 5).

Картина распределения осевого компонента  $\sigma_x$  представлена на Рис. 6. На протяжении всей обработанной поверхности на некоторой глубине

наблюдается слой со сжимающими напряжениями -610...-830 МПа. На диаметре 25 мм наблюдаются растягивающие напряжения до 1100 МПа.

В ходе решения этих задач выявлено, что на переходном участке между галтелью и диаметром 25 мм в процессе обработки образуется нестабильная пластическая волна, которая на последнем шаге обработки галтели (Рис. 7) представляет собой пластически смещенный металл с поверхностного слоя предыдущей обработанной поверхности. Так, в начале обработки цилиндрического участка диаметром 25 мм возникает пластическая волна, большая по размеру, чем на квазистационарном участке «диаметр 16 мм – галтель», имитируя тем самым наибольший натяг. Это получилось в результате того, что индентор перемещался по заданной траектории, подразумевая постоянный натяг относительно геометрии поверхности моделируемого участка. В связи с этим на поверхности образуются растягивающие напряжения до 1200 МПа. На Рис. 8-9

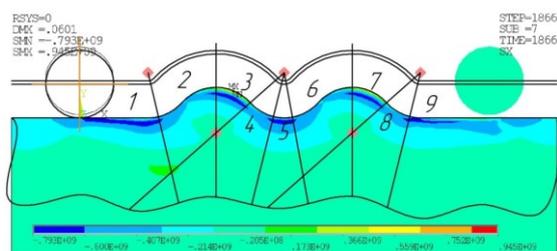


Рис. 15. Схема разбиения поверхности по численным значениям напряжений на участки  
Fig. 15. Scheme of surface division into sections according to numerical values of stresses

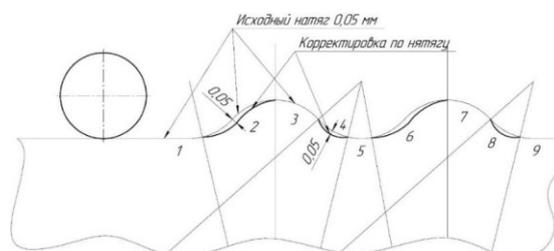


Рис. 16. Схема корректировок при решении второй задачи  
Fig. 16. Scheme of adjustments when solving the second problem

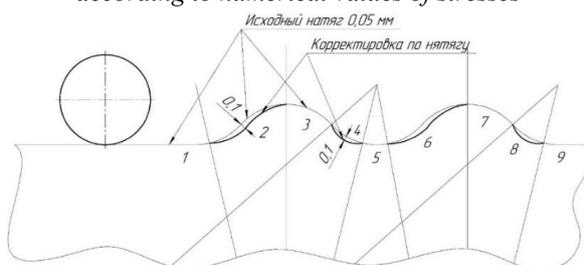


Рис. 17. Схема корректировок при решении третьей задачи  
Fig. 17. Scheme of adjustments when solving the third problem

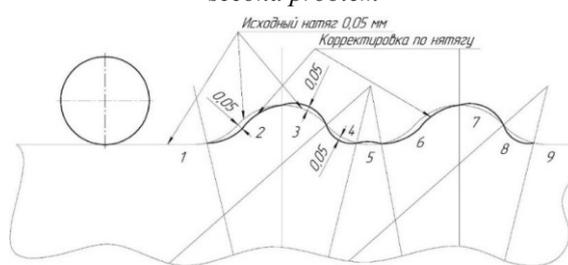


Рис. 18. Схема корректировок при решении четвертой задачи  
Fig. 18. Scheme of adjustments when solving the fourth problem

представлены первый и последний шаги обработки цилиндрического участка 25 мм, из которых видны места распределения растягивающих напряжений.

#### Влияния геометрии сложнопрофильной поверхности.

Для исследования влияния кривизны профиля поверхности на формирование НДС было выполнено МКЭ моделирование обкатывания сложнопрофильного образца, состоящего из участков с внешними и внутренними радиусами таким образом, чтобы между центрами дуг окружностей было расстояние 10 мм, а высота выпуклых участков относительно поверхности составляла 4,5 мм (Рис. 10). Данная геометрия позволила упростить расчеты траектории индентора при моделировании задач. При этом вследствие данной геометрии радиусы дуг окружностей сложнопрофильной поверхности составили 6,68 мм. Исходя из особенностей формирования НДС на углообразных участках, выявленных выше, в геометрии сложнопрофильной поверхности подобные участки были исключены.

Вся поверхность была условно разделена на 7 участков: 1 и 7 – прямолинейные цилиндрические участки, 3 и 5 – участки с внешним радиусом, 2, 4 и 6 – участки с внутренним радиусом. Свойства материала детали и все перемещения индентора задавались аналогично предыдущей задаче с учетом всех корректировок. Результаты решения задачи представлены на Рис. 11.

Можно отметить, что распределение напряжений в поверхностном слое на двух

выпуклых частях поверхности идентично, что на начальном участке выпуклой части, что на конечном участке. Автор полагает, что формы и размеры очага деформации при обработке выпуклых частей были идентичны.

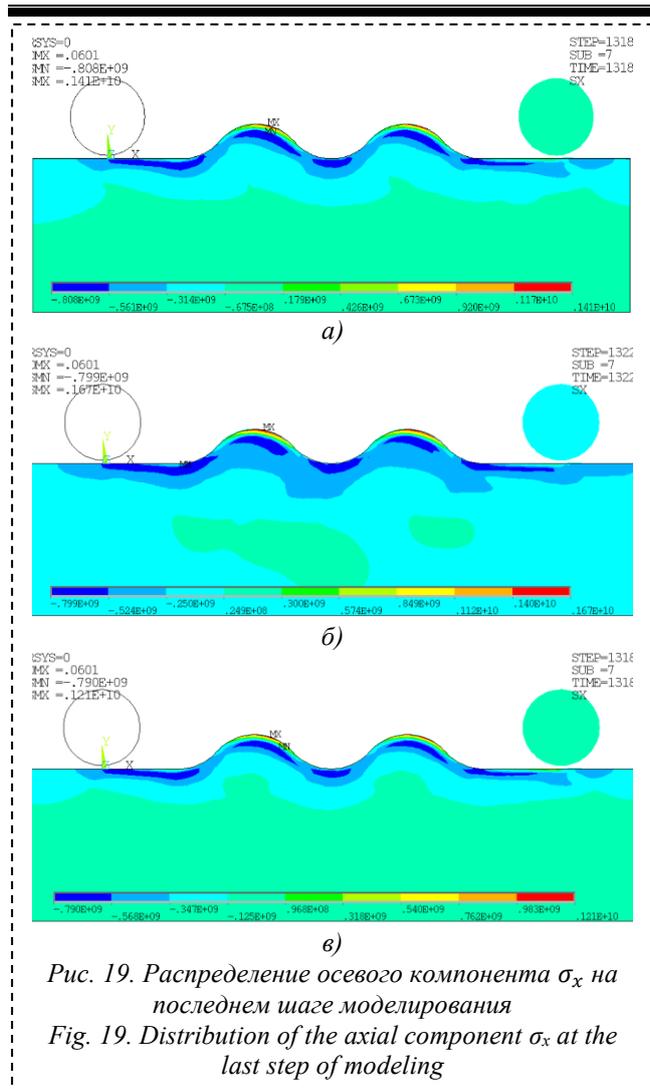
Осевой компонент  $\sigma_x$  меняется в диапазоне от -800 до 945 МПа. На всем протяжении обработанной поверхности наблюдается слой со сжимающими напряжениями до -600 МПа с участками до -800 МПа. На выпуклых частях поверхности наблюдаются растягивающие напряжения до 945 МПа. При переходе с вогнутых участков на выпуклые и наоборот изменяется распределение ОН в ПС. Вероятно, это связано с трансформацией ОД при смене участка, т. к. на каждом участке (цилиндрические, вогнутые и выпуклые) ОД разный.

Исходя из представленной картины, можно сделать вывод о том, попарные участки 1 и 7, 2, 4 и 6, 3 и 5 имеют идентичные свойства распределения напряжений. Разное НДС по всей поверхности свидетельствует о нестационарном очаге деформации в процессе обработки.

О различных формах и размерах ОД можно судить и по различной длине контактного участка между индентором и деталью (Рис. 12-14). На прямолинейной поверхности длина контакта составляет примерно 1,3 мм, на выпуклых участках – примерно 1,13 мм, на вогнутом участке – примерно 2,44 мм.

#### Влияние натяга в процессе обработки.

Для обеспечения квазистационарности очага деформации было предложено обкатывание



образца с переменным натягом в процессе обработки.

Для решения этих задач была разработана методика, которая заключалась в изменении натяга в большую сторону на участках с меньшими сжимающими напряжениями и в меньшую сторону на участках с большими сжимающими напряжениями в ПС. При этом за основу были приняты результаты задачи, в которой использовался постоянный натяг на протяжении всей обработки.

Так, поверхность была разбита на участки по распределению максимальных сжимающих напряжений (Рис. 15). Стоит отметить, что точки, через которые проходят прямые линии при разбиении, являются центрами дуг окружностей при построении профиля поверхности. Необходимость разбиения именно таким образом обусловлена особенностью постановки при решении задач с корректировками. Таким образом, участки 1, 3, 5, 7 и 9 (нечетные участки) имели максимальные сжимающие напряжения, а участки 2, 4, 6 и 8 (четные участки) имели меньшие сжимающие напряжения.

Были предложены три схемы изменения натяга в процессе обработки.

1. Плавное увеличение натяга по нечетным участкам на максимальное значение до 0,05 мм (в середине участка суммарное максимальное значение натяга  $0,05+0,05=0,1$  мм) (Рис. 16). Постановка задачи аналогична предыдущей задаче.

2. Плавное увеличение натяга по нечетным участкам на максимальное значение до 0,1 мм (в середине участка суммарное максимальное значение натяга  $0,1+0,05=0,15$  мм) (Рис. 17).

3. Плавное увеличение натяга на нечетных участках и плавное уменьшение натяга на четных участках. Увеличение и уменьшение натяга приняли на 0,5 мм (в середине участка) (Рис. 18).

В результате решения первой задачи с корректировками (Рис. 19а) на протяжении всей обработанной поверхности наблюдается слой со сжимающими напряжениями до -561 МПа с участками до -808 МПа. На выпуклых частях поверхности наблюдаются растягивающие напряжения до 1410 МПа.

В результате решения второй задачи с корректировками (Рис. 19б) на протяжении всей обработанной поверхности наблюдается неравномерный слой сжимающих напряжений до -540 МПа с участками до -799 МПа. Также на выпуклых частях поверхности наблюдаются растягивающие напряжения до 1670 МПа.

В результате решения третьей задачи с корректировками (Рис. 19в) на протяжении всей обработанной поверхности наблюдается слой со сжимающими напряжениями до -568 МПа с участками до -790 МПа.

Численные предельные значения напряжений после решения всех задач сведены в Таблицу 1.

#### Выводы.

1. Подтверждено, что при обкатывании сложнопрофильных поверхностей схема с подачей ролика по профилю поверхности является предпочтительной.

2. Установлено, что на формирование НДС в ПС может влиять кривизна обрабатываемой поверхности. Так, при обработке переходной поверхности с радиусом, значительно большим радиуса индентора, формируется квазистационарное НДС в поверхностном слое. В то же время при обработке криволинейной поверхности с радиусом профиля немногим больше радиуса индентора стационарности добиться не удалось.

3. Установлено, что на углообразных участках поверхности, образованных пересечением геометрических элементов, процесс обработки дестабилизируется. Примером является переходный участок усталостного образца между галтелью и диаметром 25 мм.

4. Установлено, что после углообразного участка формируются растягивающие напряжения больших значений, чем до этого участка. Это связано с имитацией большего натяга, который образуется фактически. Необходимо это учитывать и вносить корректировки в траекторию движения индентора.

5. Установлено, что при обработке

Таблица 1. Численные значения напряжений циклов нагрузки и разгрузки  
Table 1. Numerical values of stresses of loading and unloading cycles

Номер задачи	Минимальные напряжения, МПа	Максимальные напряжения, МПа
0	-800	945
1	-808	1410
2	-799	1670
3	-790	1210

сложнопрофильной поверхности изменение натяга на  $\pm 0,05$  мм относительно исходного незначительно сказывается на формировании НДС в ПС. Требуется рассмотреть другие возможные варианты корректировки технологических параметров.

6. Установлено, что при обкатывании с большим натягом формируются большие растягивающие напряжения. Так, в процессе моделирования на тех участках, где формировалась пластическая волна с большей высотой, при имитации большего натяга образовывались большие растягивающие напряжения.

Проведенные исследования позволили определить направление дальнейших исследований по обеспечению стационарного процесса обкатывания сложнопрофильных поверхностей для обеспечения высокой долговечности таких изделий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулов А. Г. [и др.] Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием : в 2 т. Под общ. ред. Сулова А. Г. М. : Машиностроение, 2014. Т. 1. 2014. 477 с.
2. Сулов А. Г. [и др.] Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием : в 2 т. Под общ. ред. Сулова А. Г. М. : Машиностроение, 2014. Т. 2. 2014. 444 с.
3. Блюменштейн В. Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М. : Машиностроение, 2007. 400 С.
4. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М. : Машиностроение, 2002. 300 с.

5. Вакулук В. С. Разработка метода и средств прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных деталей с концентраторами по распределению остаточных напряжений: дис... канд. техн. наук: 01.02.06. Самара, 2014. 310 с.

6. 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.

7. Kloos K., Fuchsbaue B., Adelman J. Fatigue properties of specimens similar to components deep rolled under optimized conditions // International Journal of Fatigue. 1987. № 9(1). Pp. 35–42. DOI: 10.1016/0142-1123(87)90087-9.

8. Oh I. Y., Hwang T. W., Woo Y. Y., Yun H. J., Moon Y. H. Process-induced defects in an L-shape profile ring rolling process // International Journal of Material Forming. 2018. DOI: 10.1007/s12289-018-1450-3.

9. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием.: справочник. М. : Машиностроение, 1987. 328с

10. Браславский В. М. Методы упрочнения галтелей поверхностным наклепом // Вестник машиностроения, 1968. № 2, С. 50–54.

11. Браславский В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами М. : Машиностроение, 1975. 160 с.

12. Трушин С. И. Метод конечных элементов. Теория и задачи: Учебное пособие. М. : Издательство АСВ, 2008. 256 с.

13. Чижик С. А., Витязь П. А., Хейфец М. Л., Бородавко В. И., Премент Г. Б., Клименко С. А., Батаев А. А., Блюменштейн В. Ю., Васильев А. С., Колмаков А. Г., Кречетов А. А., Панин А. В., Чугуй Ю. В. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах // Сер. Технологические комплексы: проектирование, производство, применение. Минск, 2019.

14. Махалов М. С., Блюменштейн В. Ю. Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий // Вестник машиностроения. 2014. № 12. С. 21–25.

15. Махалов М. С., Блюменштейн В. Ю. Модель формирования механического состояния и остаточных напряжений поверхностного слоя в процессах ППД с учетом эффекта упрочняемого тела // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2017) : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Кемерово, 18–21 апреля 2017 года. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2017. С. 16–23.

16. Махалов М. С., Блюменштейн В. Ю. Механика процесса поверхностного пластического

деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20. № 4. С. 6–20.

17. Скворцов Ю. В., Глушков С. В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твердого тела: интерактивное. мультимедийное. пособие; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (Нац. исслед. ун-т). Самара,

2011.

18. Кожанов Д. А., Лихачева С. Ю. Конечно-элементное моделирование в инженерных расчетах механики деформируемого твердого тела : учебное пособие. Министерство образования и науки Российской Федерации, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2024. 51 с.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Учайкин Сергей Евгеньевич**, аспирант кафедры технологии машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Российская Федерация), [uchaikinse@kuzstu.ru](mailto:uchaikinse@kuzstu.ru)

Заявленный вклад авторов:

Учайкин Сергей Евгеньевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

# INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE FORMATION OF A DEFORMATION SITE DURING THE ROLLING OF COMPLEX-PROFILE SURFACES

Sergei E. Uchaikin

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

for correspondence: [uchaikinse@kuzstu.ru](mailto:uchaikinse@kuzstu.ru)



### Article info

Received:

02 September 2024

Accepted for publication:

29 September 2024

Accepted:

10 October 2024

Published:

24 October 2024

**Keywords:** complex-profile shafts, surface plastic deformation, rolling, technological factors, stationary

### Abstract.

The article presents a study of deformation center formation during rolling of complex-profile shafts used in various products in different industries. Structural elements such as keyways and splines, fillet transitions between steps, grooves, threads, etc. are stress concentrators that adversely affect the performance properties of parts. In most cases, shafts are subject to cyclic alternating loads, so reducing the influence of concentrators is an urgent task. The analysis showed that surface plastic deformation (SPD) by rolling with rollers allows to significantly increase the cyclic service life by reducing the surface roughness of the part to Ra 0.4...0.02 with obtaining hardening up to 10 mm deep with a hardening degree of up to 20...50%. It is shown that the previously established patterns of surface layer formation inherent in the processing of cylindrical surfaces do not work to the full extent when processing transition surfaces. In this case, a non-stationary deformation zone is formed during the processing, which indicates the formation of an uneven surface layer, which certainly affects the cyclic properties of the material of this product. In the author's opinion, to ensure greater cyclic durability, it is necessary to achieve a stationary deformation zone during the processing by rolling. For this purpose, studies were performed to study the influence of the rolling scheme, the geometry of the complex-profile surface

/ quasi-stationary deformation zone, FEM modeling, stress-strain state.

and the interference fit on the formation of the stress-strain state of the metal in the deformation zone and the hardened surface layer of the part. As a result of modeling contact problems of rolling in the Ansys software product, the influence of the following on the formation of the stress-strain state was studied: two proposed rolling schemes for transition surfaces; complex-profile geometry of the surface of the part, containing and not containing sections formed by the intersection of the generating geometric elements and the variable tension of the deforming tool. The results of the studies showed the possibility of achieving a stationary / quasi-stationary deformation zone due to a combination of the analyzed technological factors.

**For citation:** Uchaikin S.E. Influence of technological factors on the formation of a deformation site during the rolling of complex-profile surfaces. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 5(165):19-29. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-19-29, EDN: DZJODT

#### REFERENCES

1. Suslov A.G. Technology and tools for finishing and hardening treatment of parts by surface plastic deformation. Vol. 1. Moscow: Mashinostroenie; 2014.
2. Suslov A.G. Technology and tools for finishing and hardening treatment of parts by surface plastic deformation. Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie; 2014.
3. Blumenstein V.Yu., Smelyansky V.M. Mechanics of technological inheritance at the stages of processing and operation of machine parts. M.: Mechanical Engineering; 2007.
4. Smelyansky V.M. Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie; 2002.
5. Vakulyuk V.S. Development of the method and means for predicting the fatigue limit of surface-hardened parts with concentrators based on the distribution of residual stresses: diss... Cand. of Engineering Sciences: 01.02.06. Samara; 2014.
6. Sidyakin Yu.I. Increasing the cyclic strength of stepped shaft fillets by rolling with rollers or balls. *Bulletin of the Volgograd State Technical University*. 2009; 8(56):37-40.
7. Kloos K., Fuchsbaue B., Adelmann J. Fatigue properties of specimens similar to components deep rolled under optimized conditions. *International Journal of Fatigue*. 1987; 9(1):35-42.
8. Oh I.Y., Hwang T.W., Woo Y.Y., Yun H.J., Moon Y.H. Process-induced defects in an L-shape profile ring rolling process. *International Journal of Material Forming*. 2018.
9. Odintsov L.G. Strengthening and finishing of parts by surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie; 1987.
10. Braslavsky V.M. Methods of strengthening fillets by surface cold hardening. *Bulletin of Mechanical Engineering*. 1968; 2:50-54.
11. Braslavsky V.M. Technology of rolling large parts with rollers. Moscow: Mashinostroenie; 1975.
12. Trushin S.I. Finite element method. Theory and tasks: Textbook. Moscow: ASV Publishing House; 2008.
13. Chizhik S.A., Vityaz P.A., Kheifets M.L., Borodavko V.I., Prement G.B., Klimenko S.A., Bataev A.A., Blumenstein V.Yu., Vasiliev A.S., Kolmakov A.G., Krechetov A.A., Panin A.V., Chuguy Yu.V. Quality assurance of products in technological complexes. Minsk: Ser. Technological complexes: design, production, application; 2019.
14. Makhlov M.S., Blumenstein V.Yu. Modeling of residual stresses at stages of the product life cycle. *Bulletin of mechanical engineering*. 2014; 12:21-25.
15. Makhlov M.S., Blumenstein V.Yu. Model of formation of mechanical state and residual stresses of the surface layer in SPD processes taking into account the effect of the hardened body. *Innovations in the fuel and energy complex and mechanical engineering*. 2017; 16-23.
16. Makhlov M.S., Blumenstein V.Yu. Mechanics of the process of surface plastic deformation. Model of a hardened elastic-plastic body. *Metal processing (technology, equipment, tools)*. 2018; 20(4):6-20.
17. Skvortsov Yu.V. Using the ANSYS FEM package to solve problems of solid mechanics [Electronic resource]: interactive multimedia manual. Samara: Ministry of Education and Science of the Russian Federation; 2011.
18. Kozhanov D.A. Finite element modeling in engineering calculations of solid mechanics: a tutorial. Nizhny Novgorod: NNGASU; 2024.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

**Sergei E. Uchaikin**, postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russian Federation, Kemerovo, Vesennaya St., 28.), uchaikinse@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Sergei E. Uchaikin – research problem statement; scientific management, reviewing the relevant literature; conceptualisation of research, data collection, data analysis, reviewing the relevant literature, drawing the conclusions, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

