

DOI: 10.34031/article_5da46203295c88.35872410

Афонин А.Н., *Мартынов Е.М., Макаров А.В.

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова
(филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»
Россия, 309516, Белгородская обл., Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42
*E-mail: e.m.martynov@mail.ru

СХЕМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ РЕЗЬБ

Аннотация. В горных и металлургических машинах часто используются тяжело нагруженные резьбовые соединения. Эффективным способом повышения усталостной прочности резьб является обработка их пластическим деформированием, однако традиционное накатывание со статическим нагружением деформирующего инструмента часто не обеспечивает требуемых для тяжело нагруженных резьб степени и глубины упрочнения. Предложен способ статико-импульсной обработки (СИО) для увеличения износостойкости тяжело нагруженных резьбовых соединений. Обоснована важность выбора рациональной схемы деформирования винтовой канавки при статико-импульсной обработке. Рассмотрены возможные схемы деформирования тяжело нагруженных резьб динамическим (ударным) воздействием инструмента, в том числе крупногабаритных. Выбор наиболее рациональной схемы деформирования способствует обеспечению необходимой глубины упрочнения и требуемой степени упрочнения в процессе статико-импульсной обработки резьб. Приведена классификация схем деформирования в осевом и радиальном сечениях заготовки. Описаны полнопрофильная, плоская, угловая, возвратная, сплошная и выборочная схемы деформирования. Даны рекомендации по выбору рациональной схемы деформирования. Приведены результаты, полученные при моделировании статико-импульсной обработки резьб, полей эквивалентных деформаций и распределения критерия разрушения Кокрофта-Лейтема. Анализ результатов моделирования показал, что при обработке резьб область экономической целесообразности применения статико-импульсной обработки шире, чем накатывания статическим нагружением инструмента.

Ключевые слова: резьба, упрочнение, статико-импульсная обработка, накатывание, режущее-деформирующая обработка, моделирование, метод конечных элементов, критерия разрушения Кокрофта-Лейтема.

В горных и металлургических машинах имеется большое количество тяжело нагруженных резьбовых соединений, подвергающихся усталостному нагружению. Наиболее эффективным способом для повышения усталостной прочности резьб является обработка их пластическим деформированием – накатыванием [1, 2–5]. Однако, традиционное накатывание со статическим нагружением деформирующего инструмента часто не обеспечивает требуемых для тяжело нагруженных резьб степени и глубины упрочнения. Значительную глубину и степень упрочнения возможно получить методом применения динамических (ударных) методов поверхностного пластического деформирования статико-импульсной обработки (СИО) [6, 7, 8].

Статико-импульсная обработка происходит при условии сочетания постоянного статического воздействия и периодического динамического деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность. Возникающее при этом динамическое (ударное) воздействие создает большие напряжения в пятне контакта заготовки и инструмента, затрачивая при этом небольшие мощности. Статический поджим при этом помо-

гает передавать ударные импульсы в обрабатываемую поверхность наиболее эффективно. При статико-импульсной обработке возможно использование, в качестве генерации ударных импульсов, электрических, пневматических и гидравлических генераторов ударных импульсов.

Нагружение инструмента ударной системой, которая состоит из волновода и бойка, обеспечивает формирование импульсов заданной формы, что позволяет добиться обеспечения оптимальных условий для протекания процесса пластической деформации. При статико-импульсной обработке возможно достижение глубины упрочнения до 10 мм и более при степени упрочнения до 100 % и более [8].

Крупные тяжело нагруженные резьбы в большинстве случаев не могут быть получены накатыванием по целому. В связи с этим для их формообразования применяется комбинированная режущее-деформирующая обработка, при которой часть материала из впадины резьбы удаляется обработкой резанием, а оставшаяся часть выдавливается СИО в выступ [9–11, 13].

При определении размеров предварительно нарезанной канавки необходимо рассчитывать не

только припуск под накатывание, но и определять геометрическую форму канавки и витков инструмента, определяющие схему перемещения металла из выступа во впадину, то есть схему деформирования.

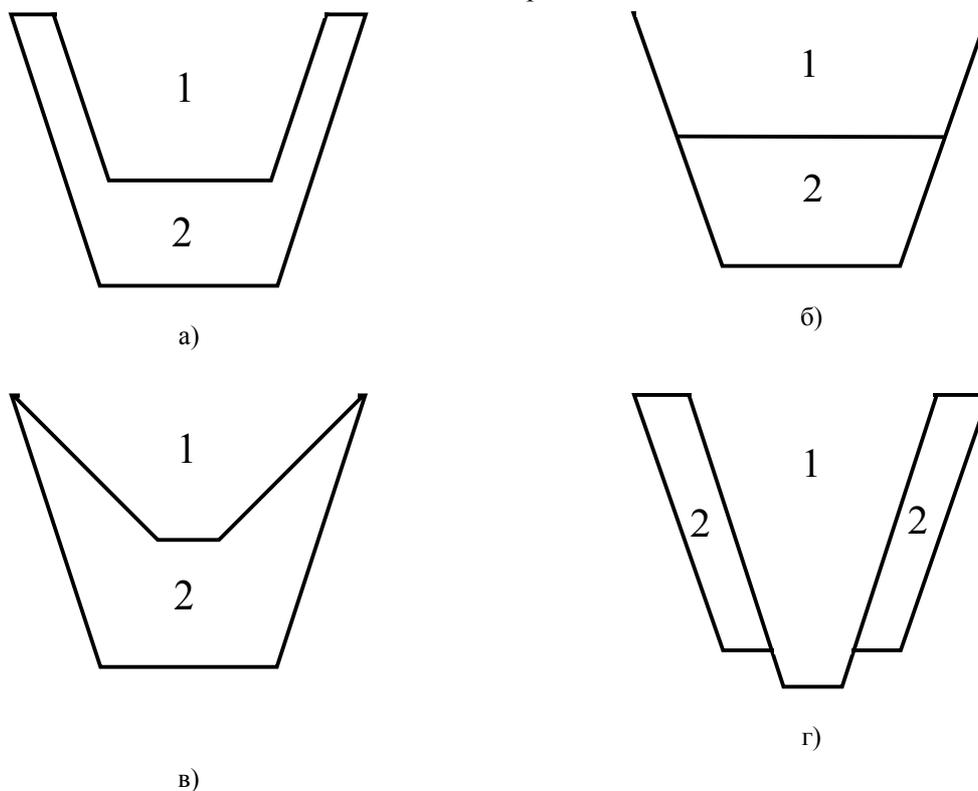


Рис. 1. Основные схемы деформирования при упрочнении СИО резьб в осевом сечении заготовки:
1 – нарезанная канавка; 2 – припуск под СИО

Полнопрофильная схема деформирования (рис. 1, а) является наиболее распространенной. Она реализуется при СИО резьбы по предварительно нарезанной канавке, форма которой полностью совпадает с формой канавки готовой резьбы, а глубина меньше, чем высота профиля готовой резьбы. Основным преимуществом полнопрофильной схемы является возможность использования для ее реализации стандартного резьбонарезного и резьбонакатного инструмента, например, резьбонарезных гребенок и резьбонакатных роликов.

Послойная схема (рис. 1, б) реализуется при статико-импульсной обработке резьбы по канавке, вырезанной на всю ширину впадины на глубину, меньше высоты профиля в готовой резьбе. Использование послойной схемы приводит к возникновению под вершинами витков деформирующего инструмента застойных зон. В связи с этим, ее целесообразно использовать только при изготовлении резьб небольшого шага (не более 2 мм).

Угловая схема деформирования (рис. 1, в) реализуется при СИО резьбы по канавке, угол

Основные схемы деформирования в осевом сечении заготовки при статико-импульсном упрочнении резьб в зависимости от формы предварительно нарезанной винтовой канавки на примере трапециевидального профиля приведены на рис. 1.

профиля которой больше или меньше угла профиля готовой резьбы. Угловая схема обеспечивает большую глубину упрочнения, по сравнению с полнопрофильной [7], однако требует для своей реализации резьбообразующего инструмента нестандартной конструкции.

Возвратная схема деформирования (рис. 1, г) реализуется при СИО резьбы по канавке, нарезанной на глубину, большую, чем высота профиля готовой резьбы. Подобная схема обеспечивает минимальные силы деформирования и величину деформации по сравнению с другими. В связи с этим она является предпочтительной при режущо-деформирующей обработке резьб с наиболее крупным шагом.

Существующие схемы деформирования при упрочнении СИО резьб в радиальном сечении заготовки в зависимости от формы предварительно нарезанной винтовой канавки приведены на рис. 2. В настоящее время практическое применение нашла лишь сплошная схема (рис. 2, а). При реализации данной схемы резьбонакатной инструмент вытесняет из впадины одинаковый на всем протяжении деформирования объем металла.

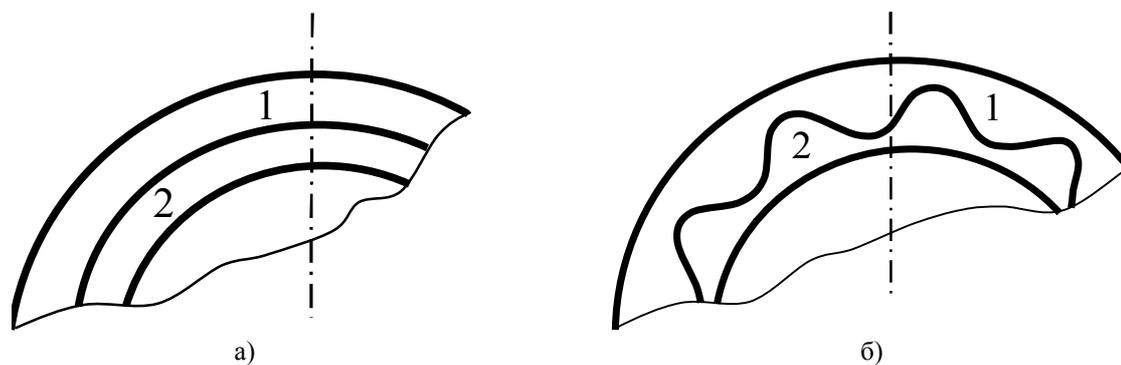


Рис. 2. Схемы деформирования при упрочнении СИО резьб в радиальном сечении заготовки:
1 – нарезанная канавка; 2 – припуск под СИО

Довольно перспективной является, пока что не применяемая в промышленности схема (рис. 2, б). Реализовав эту схему появляется возможность вырезать объемы металла из впадины неравномерно по окружности.

Классификация схем деформирования во время упрочнения статико-импульсной обработкой резьб соответствует классификации схем деформирования накатывания резьб. Обобщив представленные схемы деформирования, их можно представить в виде, показанном на рис. 3.

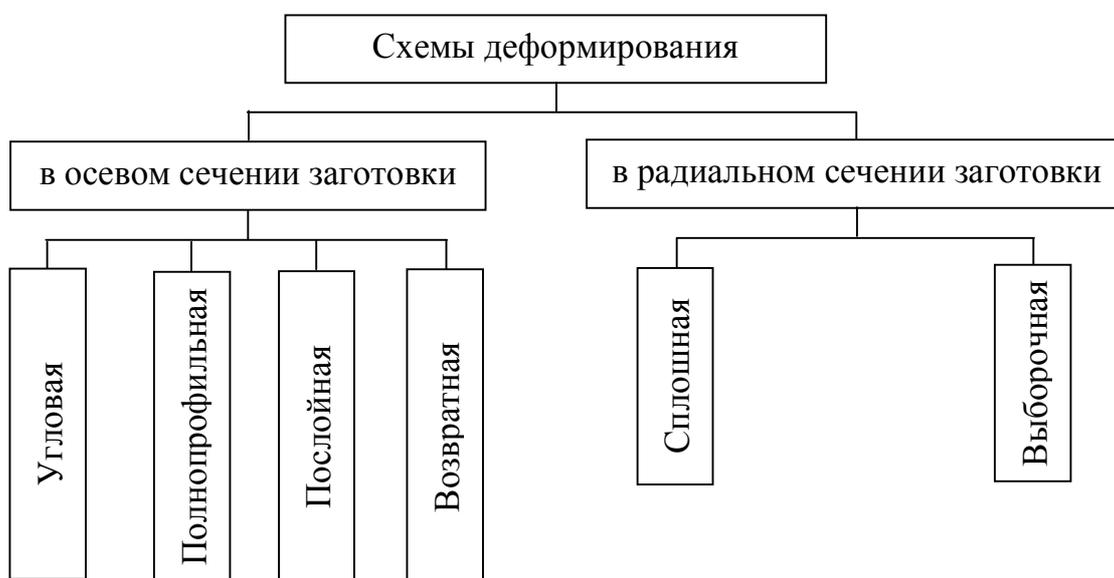


Рис. 3. Классификация существующих схем деформирования при упрочнении СИО резьб

Практическая реализация данных схем деформирования при упрочнении СИО наружных резьб возможна с помощью различных методов резьбоформообразования. Предварительное нарезание винтовой канавки в единичном и мелкосерийном производстве целесообразно производить резцами. Этот вид резьбонарезания отличается высокой универсальностью. Резьбовым резцам может быть легко придана необходимая для реализации требуемой схемы деформирования форма на универсальном заточном оборудовании. В крупносерийном и массовом производстве для предварительного нарезания винтовых канавок целесообразно использовать резьбонарезные головки.

Необходимая глубина нарезанной резьбовой канавки зависит от степени деформации, от сил,

возникающих при деформировании. В случае превышения данных параметров, возникает вероятность разрушения накатываемой резьбы. Поэтому для точного определения необходимой глубины прорезанной резьбовой канавки исследуем деформации и поля напряжений, возникающих при статико-импульсной обработке. Данные методы возможно будет провести лишь с помощью современных численных методов, таких как метод конечных элементов (МКЭ) [12].

Пример результатов, полученных при моделировании СИО резьб полей эквивалентных деформаций и распределения критерия разрушения Кокрофта-Лейтема приведен на рис. 4. При СИО величина критерия разрушения материала заготовки не должна превышать допустимого значения (для углеродистых сталей 0,65).

Анализ результатов моделирования показал, что при обработке резб области экономической целесообразности применения СИО шире, чем

накатывания статическим нагружением инструмента (рис. 5).

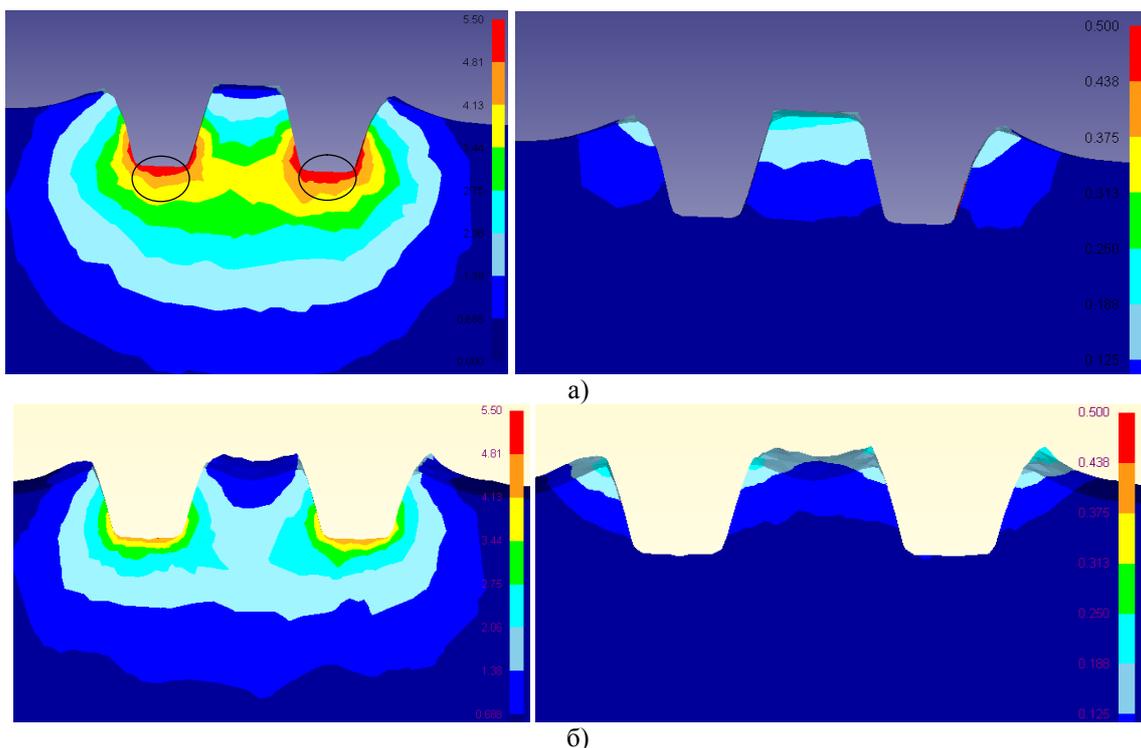


Рис. 4. Распределение эквивалентных деформаций и нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лейтема при СИО резьбы Tr40×6 по целому (а) и по канавке глубиной 0,5 мм (б) формообразования и упрочнения наружных резьб пластическим деформированием

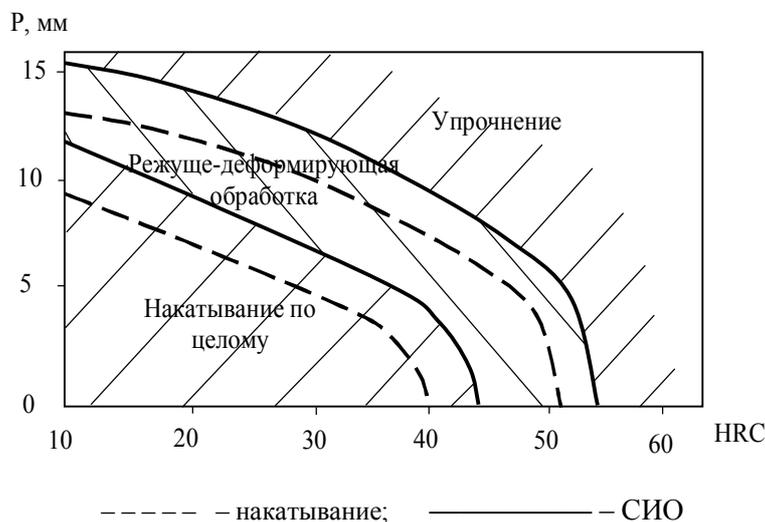


Рис. 5. Области экономической целесообразности применения способов поверхностного

Выбор наиболее рациональной схемы деформирования способствует обеспечению необходимой глубины упрочнения и требуемой степени упрочнения в процессе статико-импульсной обработки резьб. За счёт этого мы наблюдаем значительное повышение эксплуатационных характеристик ответственных тяжело нагруженных резьбовых деталей, в том числе и крупногабаритных. Усовершенствовав схему деформирования

даст возможность повышения значительной стойкости деформирующего инструмента на 150–200 % за счёт снижения сил деформирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киричек А.В., Баринов С.В., Соловьев Д.Л. Разработка параметров для описания гетеро-

генно-упрочненной структуры // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2011. № 1/285. С. 63–66.

2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога // М.: Машиностроение. 2004. 288 с.

3. Лапин В.В., Писаревский М.И., Самсонов В.В., Сизов Ю.И. Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение. 1986. 228 с.

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

5. Песин М.В. Повышение надежности резьбовых соединений нефтегазовых изделий // *Технология машиностроения*. 2011. № 9. С. 49–50.

6. Киричек А.В., Афонин А.Н. Исследование напряженно деформированного состояния резьбонакатного инструмента и заготовки методом конечных элементов // *СТИН*. 2007. №7. С. 21–25.

7. Киричек А.В., Афонин А.Н. Резьбонакатывание. Библиотека технолога. М.: Машиностроение. 2009. 312 с.

8. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Создание гетерогенной структуры материала статико-импульсной обработкой // *СТИН*. 2007. №12. С. 28–31.

9. Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Панфилов Ю.В. Инженерия поверхности деталей. М.: Машиностроение. 2008. 320 с.

10. Таурит Г.Э., Пуховский Е.С., Добрянский С.С. Прогрессивные процессы резьбоформирования. Киев: Техніка. 1975. 240 с.

11. Суслов А.Г. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение. 2014. 444 с.

12. Афонин А.Н., Ларин А.И., Макаров А.В. Гетерогенное упрочнение деталей горно-металлургических машин поверхностным пластическим деформированием // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 11. С. 823–827.

13. Киричек А.В. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки: коллективная монография. М.: Издательский дом «Спектр». 2011. 328 с.

Информация об авторах

Афонин Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры. E-mail: afonin@bsu.edu.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42.

Мартынов Евгений Михайлович, аспирант кафедры. E-mail: e.m.martynov@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42.

Макаров Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: makarov.av@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42.

Поступила в июне 2019 г.

© Афонин А.Н., Мартынов Е.М., Макаров А.В., 2019

Afonin A.N., *Martynov E.M., Makarov A.V.

*Technological institute of Stary Oskol named. A. Ugarov
(branch of National research technological University "MISIS")
Russia, 309516, Belgorod region, Stary Oskol, district Makarenko, 42
E-mail: e.m.martynov@mail.ru

HETEROGENEOUS HARDENING OF MACHINES PARTS BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Abstract. *The main causes of failure of heavily loaded threads are considered. The methods of increasing the efficiency of the equipment due to the method used are proposed. It is found that improving the operational characteristics of the components of mining and metallurgical machinery can be achieved forming heterogeneous-hardened surface layer. Methods of forming heterogeneous structure by surface plastic deformation (SPD are considered). The importance of identifying the nature of the influence of parameters of heterogeneous hardened layer on the performance of machine parts is indicated. Modeling of process heterogeneous*

hardening of SPD of the finite element method is executed. Recommendations about application of heterogeneous hardening of SPD for hardening the heavy-duty parts are offered. It is found that the use of different methods SPD allows widely vary the degree of depth and the uniformity of the hardening of machine parts. It is found that this increase in life responsible highly loaded parts operating under fatigue loading due to hardening of the heterogeneous surface layer may reach 1.5 times or more.

Keywords: *heterogeneous hardening, surface plastic deformation, fatigue strength, simulation, finite elements, mining and metallurgical machinery, quality.*

REFERENCES

1. Kirichek A.V., Barinov S.V., Solov'ev D.L. Development of parameters for the description of a heterogeneous but strengthened structure [Razrabotka parametrov dlya opisaniya geterogenno-uprochnennoj struktury]. Fundamental and applied problems of engineering and technology [Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii]. 2011. № 1/285. Pp. 63–66. (rus)
2. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Lazutkin A.G. Technology and equipment of static-pulse treatment by surface plastic deformation. Technologist library [Tekhnologiya i oborudovanie statiko-impul'snoj obrabotki poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. Biblioteka tekhnologa]. M.: Mashinostroenie. 2004. 288 p. (rus)
3. Lapin V.V., Pisarevskij M.I., Samsonov V.V., Sizov Yu.I. Rolling threads, worms, splines and teeth [Nakatyvanie rez'b, chervyakov, shlicev i zub'ev]. L.: Mashinostroenie, Leningr. otdelenie. 1986. 228 p. (rus)
4. Odincov L.G. Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation [Uprochnenie i otdelka detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem]. M.: Mashinostroenie. 1987. 328 p. (rus)
5. Pesin M.V. Improving the reliability of threaded connections for oil and gas products [Povyshenie nadezhnosti rez'bovy'x soedinenij neftegazovy'x izdelij], Mechanical Engineering Technology [Tekhnologiya mashinostroeniya]. 2011. No. 9. Pp. 49–50. (rus)
6. Kirichek A.V., Afonin A.N. Investigation of the stress-strain state of the thread rolling tool and the workpiece by the finite element method [Issledovanie napryazhenno deformirovannogo sostoyaniya rez'bonakatnogo instrumenta i zagotovki metodom konechny'x e'lementov]. Machines and tools [Stanki i instrumenty']. 2007. No. 7. Pp. 21–25. (rus)
7. Kirichek A.V., Afonin A.N. Library technologist. Thread rolling [Biblioteka tekhnologa. Rez'bonakatyvanie]. M.: Mashinostroenie. 2009. 312 p. (rus)
8. Kirichek A.V., Solov'ev D.L. Creating a heterogeneous structure of the material by static-impulse processing [Sozдание geterogennoj struktury materiala statiko-impul'snoj obrabotkoj]. Machines and tools [Stanki i instrumenty']. 2007. No. 12. Pp. 28-31. (rus)
9. Suslov A.G., Bez'yazychnyj V.F., Panfilov Yu.V. Part Surface Engineering [Inzheneriya poverhnosti detalej]. M.: Mashinostroenie. 2008. 320 p. (rus)
10. Taurit G.E., Puhovskij E.S., Dobryanskij S.S. Progressive threading processes [Progressivnyye processy rez'boformirovaniya]. Kiev: Tekhnika. 1975. Pp. 240. (rus)
11. Suslov A.G. Technology and tools for finishing and hardening the processing of parts by surface plastic deformation [Tekhnologiya i instrumenty otdelchno-uprochnyayushchej obrabotki detalej po-verhnostnym plasticheskim deformirovaniem]. M.: Mashinostroenie. 2014. 444 p. (rus)
12. Afonin A.N., Larin A.I., Makarov A.V. Heterogeneous hardening of parts of mining and smelting machines by surface plastic deformation [Geterogennoe uprochnenie detalej gorno-metallurgicheskix mashin poverxnostny'm plasticheskim deformirovaniem]. Proceedings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy [Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya]. 2015. Vol. 58. No. 11. Pp. 823–827. (rus)
13. Kirichek A.V. Effective technologies for mandible, broaching and deforming-cutting processing [Effektivnyye tekhnologii dornovaniya, protyagivaniya i deformiruyushche-rezhushchej obrabotki]: kollektivnaya monografiya. M.: Izdatel'skij dom «Spektr». 2011. 328 p. (rus)

Information about the authors

Afonin, Andrey N. DSc, Professor. E-mail: afonin@bsu.edu.ru. Technological Institute of Stary Oskol named. A. Ugarov (branch of National research technological University "MISIS"). Russia, 309516, Belgorod region, Stary Oskol, district Makarenko, 42.

Martynov, Evgeny M. Postgraduate student. E-mail: e.m.martynov@mail.ru Technological Institute of Stary Oskol named. A. Ugarov (branch of National research technological University "MISIS"). Russia, 309516, Belgorod region, Stary Oskol, district Makarenko, 42.

Makarov, Alexey V. PhD, Senior lecturer. E-mail: makarov.av@mail.ru. Technological Institute of Stary Oskol named A. Ugarov (branch of National research technological University "MISIS"). Russia, 309516, Belgorod region, Stary Oskol, district Makarenko, 42.

Received in June 2019

Для цитирования:

Афонин А.Н., Мартынов Е.М., Макаров А.В. Схемы деформирования при статико-импульсной обработке тяжело нагруженных резьб // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 106–112. DOI: 10.34031/article_5da46203295c88.35872410

For citation:

Afonin A.N., Martynov E.M., Makarov A.V. Heterogeneous hardening of machines parts by surface plastic deformation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 9. Pp. 106–112. DOI: 10.34031/article_5da46203295c88.35872410