

УДК 621.787.4

DOI: 10.12737/article_591947e23d0d82.17432094

**С.А. Зайдес, д.т.н.,
Фам Дак Фьонг, аспирант**
(Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83)
E-mail: dacphuong.ru88@gmail.com

Оценка напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей после поперечной обкатки плоскими плитами

Рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами с использованием программного комплекса ANSYS. Выявлено распределение остаточных напряжений по сечению цилиндра в зависимости от величины обжатия. Определена рациональная величина обжатия при поперечной обкатке плоскими плитами, рекомендуемая в качестве основного параметра поверхностного пластического деформирования.

Ключевые слова: упрочнение; поперечная обкатка; относительное обжатие; напряженно-деформированное состояние; упругопластическая деформация; цилиндр.

**S.A. Zaydes, D. Eng.,
Pham Dac Phuong, Post graduate student**
(Irkutsk National Research Institute Technical University,
83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russia)

Assessment of stress-strain state in cylindrical parts after transverse running with flat plates

For the deformation strengthening of parts like axles, pins, and bushes there is offered a method of surface plastic deformation based on blank rolling with flat plates. The method allows machining parts which do not have center holes. At transverse running a blank bending affected by transverse loading forces is excluded. With the aid of ANSYS program complex there is considered a change of a stress-strain state in cylindrical parts at transverse running. There are defined plastic and elastic cylinder deformations after loading. The distribution of residual stresses along cylinder section in the plane of vertical loading is obtained. The stress state of samples run with flat plates on equivalent stress is assessed. An efficient value of running at transverse running used as a basic parameter of surface plastic deformation is defined.

Keywords: strengthening; transverse running; relative squeezing; stress-strain state; elastic-plastic deformation; cylinder.

Решающую роль в обеспечении высокой надежности практически любых деталей играют поверхностные и подповерхностные слои, являющиеся по условиям работы наиболее нагруженными и поэтому самыми ответственными зонами. В этих слоях сосредоточено наибольшее количество дефектов, в них во

время эксплуатации зарождаются и развиваются микротрещины, наиболее интенсивно протекают процессы разупрочнения, изнашивания, отслаивания, окисления и т.п., происходит перераспределение остаточных напряжений, что негативно сказывается на работоспособности деталей и узлов машин [1 – 3].

Хорошо известно [4 – 6], что применение поверхностного пластического деформирования (ППД) позволяет эффективно влиять на эксплуатационную надежность широкой номенклатуры деталей машин, работающих в условиях циклических нагрузок, трения, воздействия коррозионных сред и имеющих концентраторы напряжений, места посадок с гарантированным натягом. В процессе ППД поверхностный слой претерпевает качественные изменения: сглаживаются микронеровности, повышается твердость и прочность материала, образуются остаточные напряжения сжатия, которые оказывают доминирующее влияние на циклическую прочность деталей.

Для деформационного упрочнения деталей типа осей, пальцев, втулок в работе [7] предложен перспективный способ поверхностного пластического деформирования, основанный на обкатке заготовок плоскими плитами. Предложенный способ позволяет обрабатывать цилиндрические детали, которые не имеют центровых отверстий. При поперечной обкатке исключается также изгиб заготовок от действия поперечных сил нагружения.

Аналогичную кинематическую схему силового нагружения используют в процессах поперечной прокатки при обработке металлов давлением. Однако при разработке этой технологии были обнаружены в центральной зоне заготовки большие растягивающие напряжения, благодаря которым формировалась зона с наличием трещин и повреждений (позднее несплошности металла в осевой зоне заготовки стали использовать для получения цельнотянутых труб). В этой связи возникает вопрос о величине напряженного состояния при малых обжатиях, которые предполагаются использовать для упрочняющей обработки цилиндрических деталей.

Цель данной работы заключается в определении напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами. Расчет выполнен с помощью прикладной программы ANSYS [8, 9], которая предназначена для математического моделирования различных физических процессов, используя метод конечных элементов.

Моделирование процесса поперечной обкатки в программе ANSYS позволяет определить все необходимые параметры: напряженно-деформированное состояние заготовки и инструмента в любой точке и в любой момент времени, что необходимо при разработке оптимального технологического процесса и для

глубокого анализа и понимания процессов, происходящих в заготовке при пластическом течении материала.

Схема процесса поперечной обкатки плоскими плитами представлена на рис. 1. При поперечной обкатке инструменты имеют вид плоских плит с малым углом заходной части α_1 , обеспечивающей захват заготовки. Малый угол α_2 в выходной части инструмента служит для уменьшения концентрации напряжения при выходе детали из зоны обработки. Для процесса поперечной обкатки основным параметром режима обработки является степень относительного обжатия Q :

$$Q = \frac{F_{и} - F_{пр}}{F_{пр}} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \cdot 100\%,$$

где $F_{и}$ – площадь исходного сечения заготовки; $F_{пр}$ – площадь поперечного сечения заготовки после обкатки; D – исходный диаметр заготовки; d – диаметр заготовки после обкатки.

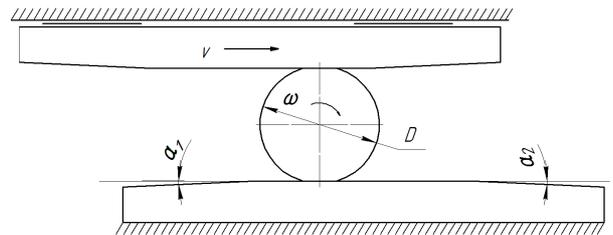


Рис. 1. Схема процесса поперечной обкатки цилиндрической заготовки плоскими плитами

Для проведения расчета в программе ANSYS были построены геометрические модели в виде цилиндра и двух плит. Конечно-элементная модель схемы нагружения цилиндра представлена на рис. 2.

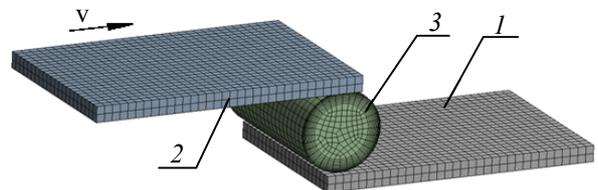


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса поперечной обкатки плоскими плитами:

1 – неподвижная плита; 2 – подвижная плита; 3 – заготовка

При поперечной обкатке ожидаются пластическая деформация и остаточные напряжения в поверхностных слоях, поэтому для цилиндра возникает потребность в построении

неравномерной – сгущающейся к поверхности сетки. Локальное измельчение сетки на поверхностных слоях выполняется заданием средней длины сторон элементов на поверхности и количества сгущающихся слоев. При этом сетка должна менять размер, становясь более грубой к оси цилиндра.

Были приняты следующие параметры моделирования: цилиндр диаметром 10 мм и длиной 20 мм из стали Ст45 ($\sigma_T = 360$ МПа); рабочие плиты размерами $3 \times 22 \times 35$ мм считаются абсолютно жесткими; величина абсолютного обжатия равна 0,05 мм ($Q = 1\%$). В схеме (см. рис. 2) нижняя плита неподвижна, верхняя плита опускается вниз до значения величины абсолютного обжатия, после этого верхняя плита перемещается вправо до перемещения заготовки на один оборот, т.е. обработка проходила по всему периметру цилиндра. Затем верхняя плита поднимается для полной разгрузки заготовки.

Напряженно-деформированное состояние цилиндра после поперечной обкатки плоскими плитами. Распределение полей остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра показано на рис. 3. На рисунке хорошо видна осесимметричность распределения компонентов остаточных напряжений по сечению цилиндра.

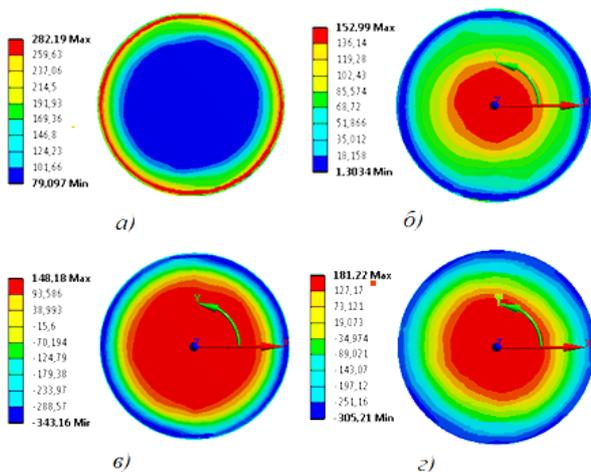


Рис. 3. Поля распределения остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра диаметром 10 мм при относительном обжатии 1 %:

a – $\sigma_{\text{ЭКВ}}$; *б* – σ_r ; *в* – σ_θ ; *з* – σ_z

На рис. 4 более подробно показано распределение остаточных напряжений по сечению цилиндра после поперечной обкатки. Радиальные остаточные напряжения σ_r по сечению цилиндра являются растягивающими и монотонно возрастают от поверхности цилиндра к его центру. Распределение тангенциальных σ_θ

и осевых остаточных σ_z напряжений носит знакопеременный характер. Для них максимальные напряжения сжатия наблюдаются на некоторой глубине от периферии, а максимальные напряжения растяжения формируются в центральной зоне цилиндра.

Эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ непрерывно увеличивается от центра до подповерхностных слоев, а далее немного понижается на поверхности цилиндра. Данная схема остаточных напряжений в цилиндре является благоприятной с точки зрения эксплуатационных характеристик валов, так как она способствует значительному повышению предела выносливости вала.

В работе [10] представлены результаты измерения остаточных напряжений на поверхности деталей упрочненных поперечной обкаткой. Остаточные напряжения оценивали методом рентгеноструктурного анализа напряжений с помощью прибора XStressG3/G3R. При относительном обжатии $Q = 1\%$ на поверхности цилиндрической детали диаметром 10 мм тангенциальное остаточное напряжение составляет -270 МПа, а осевое остаточное напряжение -207 МПа. Данные результаты измерения хорошо согласуются с результатами расчета в программе ANSYS.

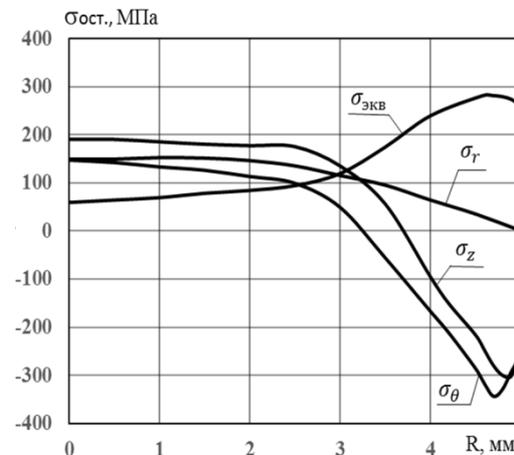


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений по сечению цилиндрических образцов после поперечной обкатки

Чтобы оценить уровень изменения диаметра цилиндра по сравнению с абсолютной величиной обжатия приводится показатель доли пластической деформации. Доля пластической деформации δ считается как отношение пластической деформации к абсолютному обжатию в процентах $\left(\delta = \frac{\Delta D}{\Delta H} \cdot 100\% \right)$. Диа-

метр цилиндра после поперечной обкатки с абсолютным обжатием 0,05 мм уменьшается на 10 мкм, что соответствует доли пластической деформации $\delta = 20\%$. Это значит, что большая часть абсолютного обжатия идет на упругую деформацию металла центральной зоны цилиндра.

На рис. 5 показано изменение диаметра и осевой деформации по длине цилиндра. У двух торцов цилиндра имеется резкое повышение изменения диаметра и появление осевой деформации. В процессе поперечной обкатки в зоне контакта материала заготовки подвергается упругопластическому деформированию. При этом металл перемещается не только в радиальном направлении, но и в осевом. Осевому перемещению металла поперечных слоев препятствуют соседние слои. А поперечные слои металла у двух свободных торцов цилиндра свободно деформируются в осевом направлении. Именно там наблюдается максимальная осевая деформация. Это, так называемый, краевой эффект.

Действие краевого эффекта выражается в неидентичности остаточных напряжений вдоль оси цилиндра, а также в небольшом удлинении цилиндра после обкатки. При данном условии поперечной обкатки длина зоны действия краевого эффекта составляет около 3 мм. Максимальное отклонение диаметра цилиндра после обкатки составляет 4,5 мкм, что соответствует седьмой степени точности на цилиндричность. У двух торцов удлинение поверхностных слоев составляет 0,04 мм. На практике это удлинение не выходит за предел конструктивной фаски для вала данного размера (ширина фаски 0,5...1,0 мм).

Влияние диаметра цилиндра на напряженно-деформированное состояние цилиндрических образцов после поперечной обкатки. При одинаковом абсолютном обжатии ΔH напряженно-деформированное состояние цилиндров других размеров будет совершенно другим. При одинаковом абсолютном обжатии, чем больше диаметр цилиндра, тем

больше его абсолютная упругая деформация. Уменьшение доли пластической деформации в поверхностных слоях приводит к снижению благоприятных остаточных напряжений в поверхностных слоях. Поэтому, чтобы оценить влияние масштабного фактора при поперечной обкатке, необходимо сопоставить напряженно-деформированное состояние разных цилиндров при одинаковом относительном обжатии Q .

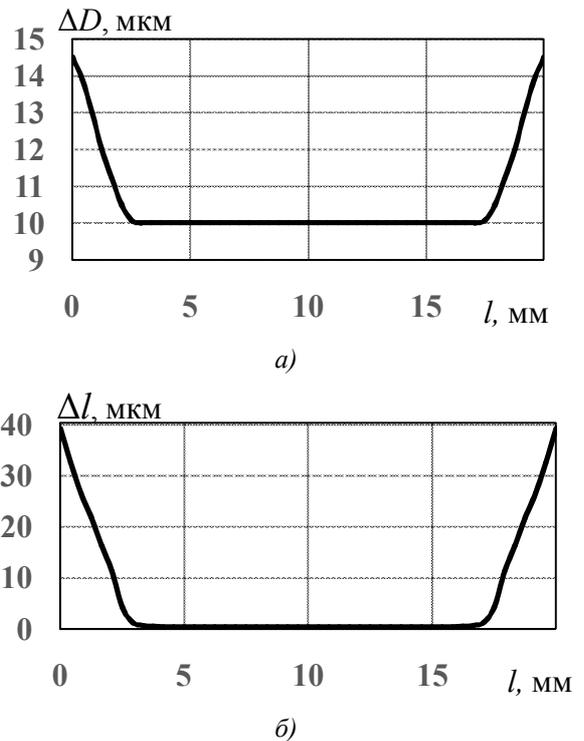


Рис. 5. Изменение диаметра (а) и осевой деформации (б) вдоль оси цилиндрического образца

Опыты проведены для цилиндров различных диаметров с относительным обжатием $Q = 1\%$. Для исключения влияния краевого эффекта длина цилиндров также принята равной двойному диаметру ($l = 2D$). Максимальные остаточные напряжения и пластическая радиальная деформация для цилиндров разных диаметров при одинаковом относительном обжатии представлены в табл. 1.

1. Остаточные напряжения и пластическая радиальная деформация в зависимости от диаметра цилиндров

Диаметр цилиндра, мм	σ_r , МПа		σ_θ , МПа		σ_z , МПа		$\sigma_{\text{экв}}$, МПа		ΔD , мкм	δ , %
	max	min	max	min	max	min	max	min		
10	153	1,3	148	-343	181	-305	282	79	10,0	20,00
20	160	-0,16	150	-340	190	-310	287	80	19,8	19,85
40	158	2,5	153	-337	186	-303	280	77	39,6	19,79
60	156	-0,35	147	-344	185	-300	285	75	59,8	19,93

Значения остаточных напряжений и доли пластической деформации являются свидетельством того, что при поперечной обкатке можно определить напряженно-деформированное состояние цилиндров по заданному относительному обжатию. Тогда зависимость остаточных напряжений и деформаций от относительного обжатия для цилиндра конкретного диаметра будет справедлива для цилиндров других размеров.

Влияние степени относительного обжатия на напряженно-деформированное состояние цилиндрических образцов после поперечной обкатки. Подобные расчеты повторно проведены для того, чтобы оценить напряженно-деформированное состояние цилиндра после поперечной обкатки при различных величинах обжатия цилиндра диаметром 10 мм.

Зависимость максимальных остаточных напряжений и доли пластической деформации от степени относительного обжатия представлена на рис. 6. С увеличением относительного обжатия доля пластической деформации монотонно повышается. Остаточные растягивающие радиальные напряжения в центральной зоне цилиндра достигают большого значения по сравнению с пределом текучести.

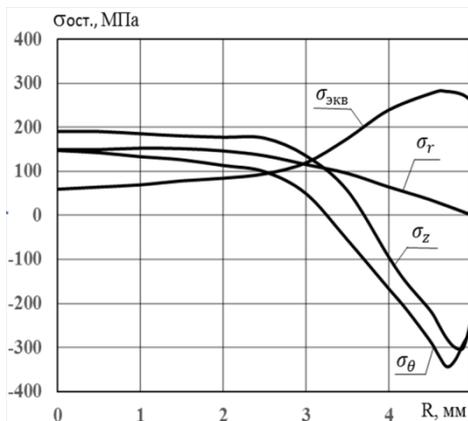


Рис. 6. Зависимость максимальных остаточных напряжений и пластической деформации цилиндра от степени относительного обжатия:

δ – доля пластической деформации; $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$ – максимальные эквивалентные напряжения; σ_r^{max} – максимальные растягивающие радиальные напряжения

При относительном обжатии $Q = 2\%$ максимальное растягивающее радиальное напряжение составляет примерно 72 % от σ_t . При относительном обжатии Q меньше 0,6 % наблюдаются малая доля пластической деформации и малые эквивалентные напряжения. При дальнейшем увеличении Q до 1,6 % доля пластической деформации и эквивалентные напряжения быстро возрастают и затем увеличиваются в небольшой степени.

При этом компоненты растягивающих радиальных напряжений в центре цилиндра монотонно повышаются. Поэтому с целью формирования благоприятной схемы остаточных напряжений оптимальное значение относительного обжатия для поперечной обкатки находится в диапазоне 0,8...1,6 %. Оптимальное значение относительного обжатия составляет около 1 %. При данном относительном обжатии максимальное напряжение сжатия у поверхности достигает -343 МПа и максимальное напряжение растяжения в центре цилиндра составляет 181 МПа.

Глубина упрочнения относится к основным характеристикам качества поверхностного пластического деформирования. На рис. 7 показана радиальная пластическая деформация по радиусу детали при обкатке цилиндра с относительным обжатием $Q = 1\%$. По этому рисунку можно определить толщину пластически деформированного слоя детали h . Эту толщину можно принять за глубину упрочненного слоя.

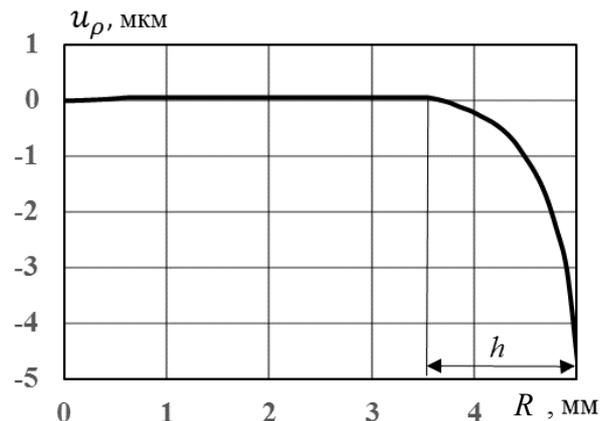


Рис. 7. Радиальная пластическая деформация по радиусу детали (при $Q = 1\%$)

Зависимость глубины h от относительного обжатия показана на рис. 8. С увеличением относительного обжатия глубина упрочненного слоя возрастает. На рис. 8 также показан результат определения глубины упрочненного слоя путем измерения микротвердости по поперечному сечению упрочненных деталей [10].

Результат измерения глубины упрочненного слоя на 10...13 % меньше чем при расчете по компьютерной программе. Это обстоятельство объясняется тем, что зона заметного увеличения микротвердости материала всегда меньше, чем зона пластической деформации. Поэтому для результата определения глубины упрочненного слоя в программе необходимо снять 10...15 % значения, чтобы получить более корректный результат.

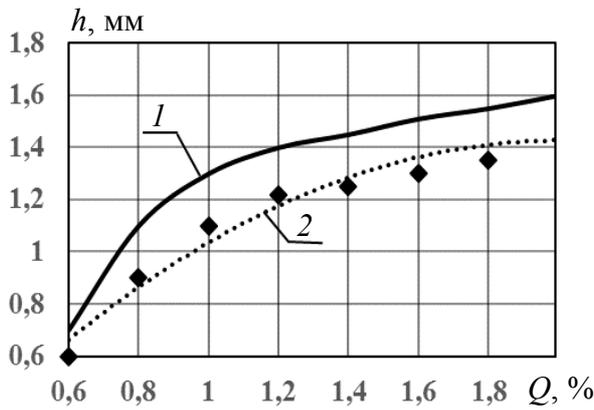


Рис. 8. Зависимость глубины упрочненного слоя от относительного обжатия:

1 – результат расчета в программе ANSYS; 2 – результат измерения на практике

Выводы

С помощью программы ANSYS рассмотрено напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами. Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

1. Установлена благоприятная схема остаточных напряжений деталей, упрочненных поперечной обкаткой. Радиальные остаточные напряжения по сечению цилиндра являются растягивающими и монотонно возрастают от поверхности цилиндра к его центру. Распределение тангенциальных и осевых остаточных напряжений носит знакопеременный характер. Максимальные напряжения сжатия наблюдаются на некоторой глубине от периферии, а максимальные напряжения растяжения наблюдаются в центральной зоне цилиндра.

2. При одинаковом относительном обжатии Q цилиндрические детали разных диаметров после поперечной обкатки плоскими плитами находятся в одинаковом напряженно-деформированном состоянии.

3. При поперечной обкатке плоскими плитами наблюдается краевой эффект, выражающийся в неидентичности остаточных напряжений вдоль оси цилиндра, а также в небольшом удлинении цилиндра после обкатки. Однако с учетом конструктивной фаски краевой эффект оказывает малое влияние на точность обработанных деталей.

4. С увеличением относительного обжатия остаточные растягивающие радиальные напряжения в центральной зоне цилиндра монотонно увеличиваются. По этой причине при поперечной обкатке плоскими плитами необходимо выбирать рациональную величину обжатия, чтобы исключить возможность образования трещин в центральной зоне цилиндрических деталей.

5. Установлено рациональное значение относительного обжатия при поперечной об-

катке, используемой в качестве способа поверхностного пластического деформирования. При обкатке сплошного цилиндра рациональный диапазон значения относительного обжатия находится в пределах 0,8...1,6 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Одинцов, Л.Г., Плешаков, В.В. Технологическое обеспечение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин алмазным выглаживанием // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. № 1(19). – С. 41–48.
2. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 318 с.
3. Балтер, М.А. Упрочнение деталей машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
4. Чепя, П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием. – Минск: Наука и техника, 1981. – 128 с.
5. Отеный, Я.Н. Технологическое обеспечение качества деталей машин поверхностным пластическим деформированием: монография. Волгоград: Политехник, 2005. – 224 с.
6. Зайдес, С.А., Забродин, В.А., Мураткин, Г.В. Поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 404 с.
7. Фам Дак Фыонг, Зайдес, С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение условий поперечной обкатки при поверхностном пластическом деформировании // Вестник ИрГТУ. – 2015. № 4. – С. 48–52.
8. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в AnsysWorkbench. Часть 1. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
9. ChenXiaolin, LiuYijun. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench.: CRC Press, 2014. – 411 p.
10. Зайдес, С.А., Фам Дак Фыонг. Оценка качества цилиндрических деталей после поперечной обкатки плоскими плитами / Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) // Матер. докладов VI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. 2016. – С. 74–85.

REFERENCES

1. Odintsov, L.G., Pleshakov, V.V. Technological support of surface and operation characteristics quality in machine parts by diamond smoothing // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. № 1(19). – pp. 41–48.
2. Suslov, A.G. *Surface Layer Quality in Machine Parts*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 318.
3. Balter, M.A. *Machinery Strengthening*. – M.: Mechanical Engineering, 1978. – pp. 184.
4. Chepa, P.A. *Technological Fundamentals for Parts Strengthening by Surface Deformation*. – Minsk: Science and Engineering, 1981. – pp. 128.
5. Oteny, Ya.N. *Technological Support of Machine Parts Quality by Surface Plastic Deformation*: monograph. Volgograd: Polytechnic, 2005. – pp. 224.
6. Zaydes, S.A., Zabrodin, V.A., Muratkin, G.V. *Surface Plastic Deformation*. – Irkutsk: Publishing House of IrSTU, 2007. – pp. 404.
7. Fam Dak Fyong, Zaydes, S.A., Nguen Van Huan. Definition of conditions for transverse running at surface plastic deformation // *Bulletin of IrSTU*. – 2015. № 4. – pp. 48–52.
8. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.E. *Engineering Analysis in AnsysWorkbench*. Part 1. – Samara: Samara State Technical University, 2010. – pp. 271.
9. ChenXiaolin, LiuYijun. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench.: CRC Press, 2014. – 411 p.
10. Zaydes, S.A., Fam Dak Fyong. Assessment of cylindrical part quality after transverse running with flat plates / *Constructional Material Life Cycle (from manufacturing to utilization)* // *proceedings of the VI-th All-Russian Scientific Technical Conf. with Inter. Participation*. 2016. – pp. 74–85.

Рецензент д.т.н. В.П. Кольцов