

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЦЕМЕНТАЦИИ И ЗАКАЛКИ

П.П. Шаврин

shav-pasha@yandex.ru

SPIN-код: 3507-1500

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен способ уменьшения влияния коробления деталей, подвергающихся цементации и закаливанию, на окончательные размеры деталей. Проблема является актуальной, поскольку постоянно возникает в ходе реального производства. Исследовано влияние коробления (деформации) на размеры стальных деталей. Анализ результатов измерений позволил определить числовые значения уменьшения линейных и диаметральных размеров деталей. Важность исследования заключается в том, что при известных качественных характеристиках проблемы ее числовые показатели, важные для практической работы, в литературе и публикациях практически не приводятся. Предложено при расчете технологических размерных цепей на этапе проектирования технологического процесса для уменьшения брака и улучшения эксплуатационных свойств деталей увеличивать размеры деталей перед цементированием на 0,05...0,20 % относительно номинального технологического размера.

Ключевые слова

Технологический процесс, размер детали, припуск, коробление, деформация, цементация, закалка

Поступила в редакцию 30.04.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Постановка проблемы. Проблема коробления (деформации) деталей при термической обработке (ТО) и химико-термической обработке (ХТО) достаточно известна и отмечена в ряде работ последних лет [1, с. 181–203; 2–4]. Вместе с тем технолог механического цеха — разработчик основной технологии по изготовлению детали, где есть цементуемые поверхности, — несет ответственность за качество деталей, изготовленных по его технологии. Как правило, он не имеет возможности влиять на величину коробления, поскольку факторы, ее определяющие, находятся в ведении других служб предприятия, а то и вовсе сторонних исполнителей.

Таким образом, определение конкретных числовых и относительных величин коробления поможет технологам при проектировании технологических процессов.

Цементация — это диффузионное насыщение углеродом поверхностного слоя стали при температуре 900...950 °С. В результате цементации и последующей ТО повышаются значения твердости, износоустойчивости, предела усталости и сопротивления контактной усталости поверхностного слоя при сохранении вязкой сердцевины. При этом цементация обеспечивает выгодное распре-

деление углерода по сечению, а окончательные свойства цементованной детали обеспечиваются термической обработкой [5, с. 293; 6, с. 395].

Наиболее распространенной технологией цементации является цементация в газовой среде [6, с. 402].

На АО «МПО им. И. Румянцева» газовая цементация выполняется в шахтных печах периодического действия моделей Ц-60, Ц-75.

Детали, подвергаемые цементации, нагреваются в печах до температуры 925 ± 10 °С, а затем вне печи свободно остывают на воздухе до температуры производственного помещения 28 °С. При последующей термической обработке детали также проходят через ряд циклов «нагрев – охлаждение»: закалка с температуры 910...930 °С в масло на стабилизирующих оправках, обработка холодом при температуре ниже –70 °С и отпуск при температуре 210...240 °С с выдержкой не менее 3 ч.

Многочисленные нагревы вызывают изменения размеров, поэтому цементированные изделия должны проходить шлифовку («под размер») [5, с. 294], для чего на деталях оставляют небольшой припуск [6, с. 395]. Удаление припуска позволяет обеспечить однородность рабочей поверхности детали. Вместе с припуском удаляется небольшая часть цементированного слоя, имеющая дефекты, включения и неоднородности, которые могут сказаться на эксплуатационных свойствах поверхности [7, 8].

При проектировании детали конструктор указывает в технических требованиях конструкторского чертежа необходимую твердость цементированной поверхности и глубину слоя цементации [9].

Технолог механического цеха, руководствуясь требованиями чертежа, по известному технологическому слою цементации (согласуется с цехом ТО и ХТО) определяет размер удаляемого припуска согласно табл. 1 [10, с. 2].

Таблица 1

Припуск на отделку после цементации и термической обработки

Припуск	Глубина технологического слоя цементации, мм	Значение припуска, мм
Минимальный P_{\min}	0,4 – 0,7	0,05
	0,6 – 1,0	0,10
	0,9 – 1,3	0,15
	1,2 – 1,7	0,20
Максимальный P_{\max}	Любая	25 % минимального значения технологического слоя цементации

Значения припусков учитываются в расчетах технологических размерных цепей и допусков на размеры деталей на различных операциях технологического процесса. Технологические размеры детали, как правило, не учитывают коробление размеров детали, поскольку на этапе проектирования эти значения количественно неизвестны.

Технологический процесс изготовления детали, отдельные поверхности которой подвергаются цементированию с закалкой и отпуском, в общем случае имеет структуру, показанную на рис. 1.

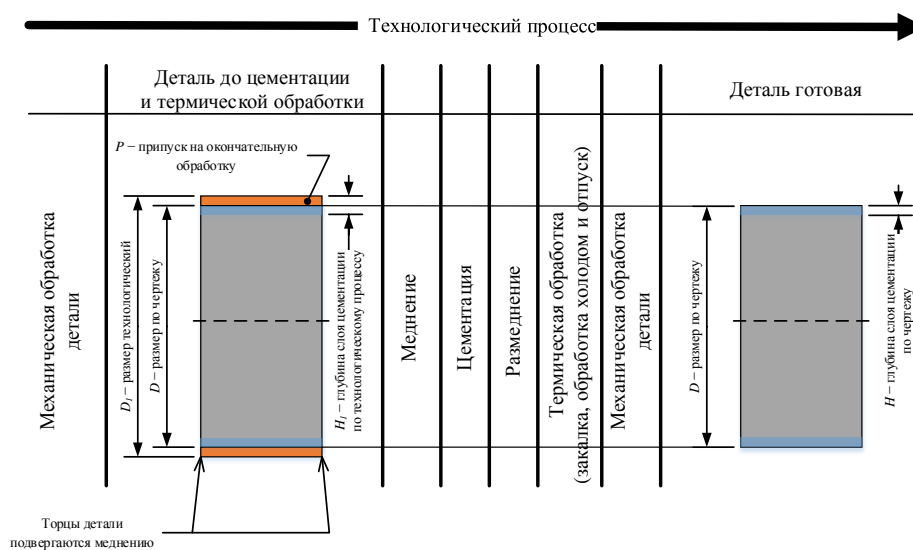


Рис. 1. Общая структура технологического процесса изготовления детали, подвергаемой цементации, закалке и отпуску

Согласно рис. 1 можно составить систему уравнений

$$\begin{cases} H_1 = H + P; \\ D_1 = D + 2P, \end{cases}$$

где H_1 — технологический слой цементации, мм; H — конструкторский слой цементации, мм; P — припуск по табл. 1, мм; D_1 — технологический размер детали, мм; D — размер детали по конструкторскому документу, мм.

С учетом допусков на размеры и данных табл. 1 получаем систему выражений, которая должна выполняться при разработке технологического процесса:

$$\begin{cases} P_{\min} \in (0,05; 0,20); \\ P_{\max} = 0,25H_{1\min}; \\ P_{\min} = \frac{D_{1\min} - D_{\max}}{2}; \\ P_{\max} = \frac{D_{1\max} - D_{\min}}{2}; \\ H_{\max} \geq H_{1\max} - P_{\min}; \\ H_{\min} \geq H_{1\min} - P_{\max} \Rightarrow H_{\min} \geq 0,75H_{1\min}, \end{cases} \quad (*)$$

где индексы min и max означают минимальное и максимальное значение соответствующей величины. Кроме того, значение P_{\min} должно быть достаточным для обеспечения точности и шероховатости поверхности детали.

При малых допусках на окончательные размеры деталей и ограниченных припусках на отделочные операции коробление деталей после цементации и закалки с отпуском очень существенно влияет на качество деталей. Возможные случаи показаны на рис. 2–4.

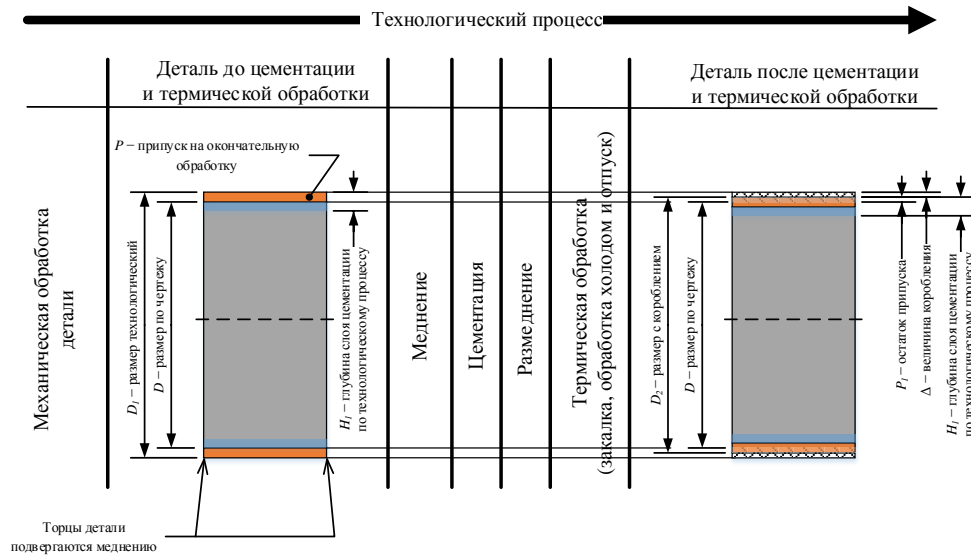


Рис. 2. Случай 1

В первом случае (см. рис. 2) имеем деформацию на сторону $\Delta \in (0; P_{\max})$, при этом припуск P частично уходит в область размера D , получается фактический размер детали D_2 . Остаточный припуск P_1 в этом случае определяется системой уравнений

$$\begin{cases} P_{1\min} = P_{\min} - \Delta = \frac{D_2 - D_{\max}}{2} \Rightarrow P_{1\min} < P_{\min}; \\ P_{1\max} = P_{\max} - \Delta = \frac{D_2 - D_{\min}}{2} \Rightarrow P_{1\max} < P_{\max}, \end{cases}$$

тем самым для детали не выполняется условие $H_{\max} \geq H_{1\max} - P_{\min}$ из системы (*).

Следовательно, возможен брак по глубине слоя цементации у части деталей, повышенное содержание углерода, хрупкость, снижение эксплуатационных характеристик.

Во втором случае (см. рис. 3) деформация на сторону $\Delta = P_{\max}$ и остаточный припуск $P_{1\min} = P_{1\max} = 0$, поэтому не выполняются условия по максимальному и минимальному припуску из системы (*), а также невозможно окончательно обработать поверхность детали.

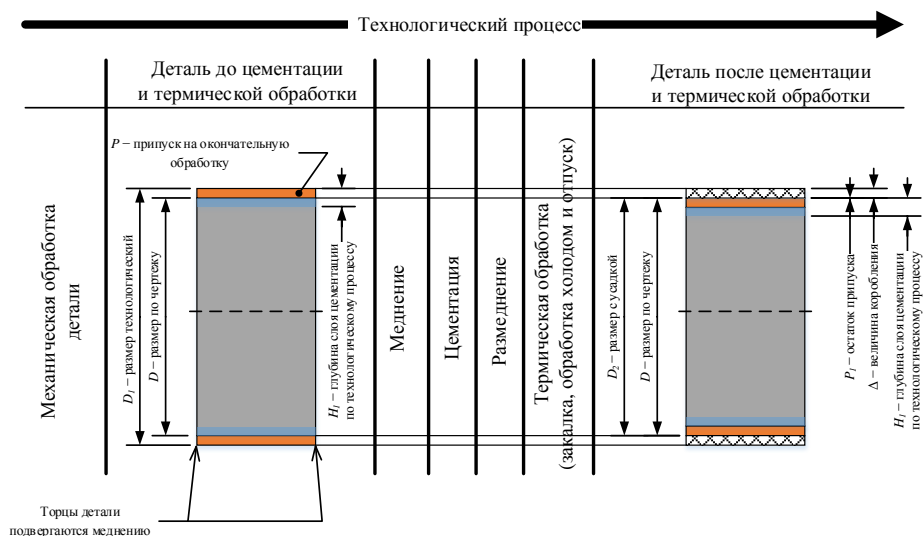


Рис. 3. Случай 2

Следовательно, возможен брак по толщине слоя цементации и качеству поверхности детали.

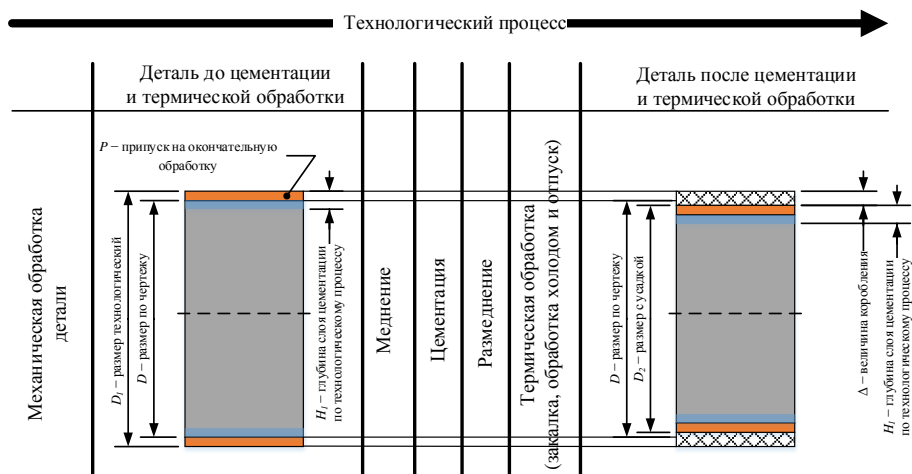


Рис. 4. Случай 3

В третьем случае (см. рис. 4) деформация на сторону $\Delta > P_{\max}$ и размер в детали меньше конструкторского.

Следовательно, возможен брак из-за несоответствия окончательных размеров детали чертежу.

Существенным является то обстоятельство, что глубина слоя цементации назначается и контролируется от реальной поверхности детали, таким образом, даже при короблении поверхности детали она остается такой, какой заложена в технологическом процессе цементирования. Конечное значение глубины слоя

цементации определяется именно размерами окончательной обработки, которые назначены инженером-технологом. В серийном производстве с большой номенклатурой деталей невозможно подбирать и устанавливать индивидуальные размеры для каждой детали.

В работе [2] предложено изменять геометрические размеры деталей на значение деформации до цементирования и термообработки. Для этого необходимо заранее знать числовое значение коробления или иметь механизм его расчета, чтобы учесть это значение в составе технологических размерных цепей (т. е. в составе размера D_1).

Метод решения задачи. Для определения значений коробления деталей на АО «МПО им. И. Румянцева» под руководством автора была организована работа по систематическому измерению деталей на ключевых этапах технологического процесса: до цементирования, после цементирования, после закаливания с отпуском. Измерению подвергались линейные и диаметральные размеры цементируемых поверхности деталей, подвергающиеся после закалки отделочной обработке. Измерения проводились с точностью до 0,001 мм с использованием цеховых средств измерения (скобы рычажные СР-100 0,001, наборы концевых мер длины ГОСТ 9038–90, нутромеры с ценой деления 0,001 мм, КИМ Contura G2). Накопленный статистический материал был проанализирован.

Экспериментальная часть. Измерены 39 деталей № 371 (рис. 5–7) и 40 деталей № 391 (рис. 8) из стали 16ХЗНВФМБ-Ш-2 ТУ 14-1-3242-81. Детали проходили технологический процесс тремя партиями (12, 12 и 15/16 шт. соответственно). Поскольку при закалке в масло использовались стабилизирующие оправки, которые предотвращали значительное коробление (изменение размеров было менее 0,01 мм на диаметр), в результате анализа эти измерения включены не были.

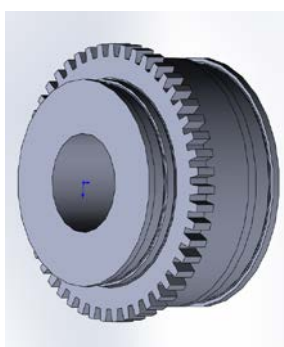


Рис. 5. Вид детали № 371

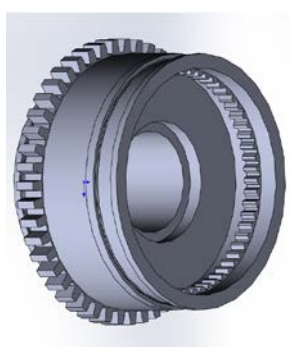


Рис. 6. Вид детали № 371

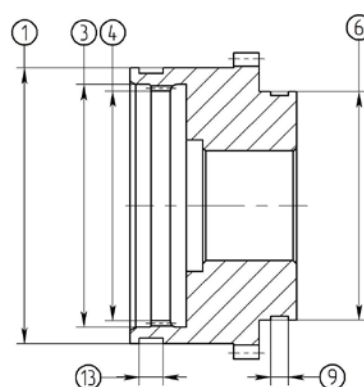


Рис. 7. Контролируемые размеры детали № 371

Результаты измерений детали 371 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Деформации размеров детали № 371 после цементирования

Размер	Размеры до цементации, мм	Средний размер T , мм	Средняя деформация на размер 2Δ , мм	$T/2\Delta$, %
1	87,8300 – 87,8543	87,8422	0,1199	0,137
3	77,6811 – 77,7200	77,7006	0,1265	0,163
4	73,5460 – 73,5800	73,5630	0,1026	0,139
6	73,0300 – 73,0602	73,0451	0,0293	0,040
9	5,78 – 5,81	5,7950	0,0097	0,167
13	7,78 – 7,81	7,7950	0,0092	0,118

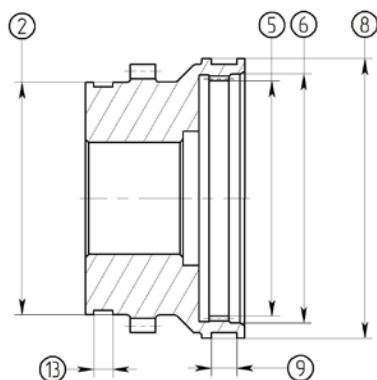


Рис. 8. Контролируемые размеры детали № 391

Результаты изменения размеров детали № 391 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Деформации размеров детали № 391 после цементирования

Размер	Размеры до цементации, мм	Средний размер T , мм	Средняя деформация на размер 2Δ , мм	$T/2\Delta$, %
2	73,0430 – 73,0670	73,0550	0,0345	0,047
5	73,5400 – 73,6400	73,5900	0,1086	0,148
6	78,1500 – 78,2397	78,1949	0,1578	0,202
8	87,3760 – 87,6800	87,5280	0,1064	0,122
9	5,78 – 5,81	5,7950	0,0145	0,250
13	7,78 – 7,81	7,7950	0,0117	0,150

Как видно из изложенного, существенным для коробления является наличие или отсутствие сплошного металла. В «толстом» сегменте деталей (центральное отверстие имеет диаметр около 35 мм) деформации составляют не более 0,05 % среднего значения размера в детали перед цементацией. Для остальных размеров деформация в основном попадает в диапазон 0,1...0,2 %.

Преимущественно деформация происходила «в минус», т. е. размеры уменьшались. Размеры 9 и 13 у некоторых деталей деформировались «в плюс», т. е. увеличивались, но значение деформации для них оказалась таким же, как и для случая сжатия, — 0,01...0,02 мм.

Полученные данные в целом подтверждаются производственной практикой и результатами измерения размеров у деталей иных конфигураций и других материалов (сталь 20Х3МВФ). Практика также показывает, что для деталей, закаливаемых в свободном состоянии с охлаждением в масло или в вакуумной печи с охлаждением азотом, установленные зависимости сохраняются, поскольку при закаливании происходит нагрев деталей до температуры 910...930 °С с последующим, пусть и резким, охлаждением.

Таким образом, если в технологическом процессе после цементирования отдельно выполняется закалка, то коробление происходит дважды на примерно одинаковое значение.

Для исключения повторного коробления целесообразно при закалке в масло применять стабилизирующие оправки. Деталь надевается на оправку, а затем опускается в масло. При закаливании в вакуумной печи с охлаждением азотом такие оправки должны быть изготовлены из материалов, сохраняющих геометрическую форму при высокой температуре, поскольку детали надеваются на оправку в «холодном» состоянии и вместе с оправкой устанавливаются в печь.

Автор не исследовал вопрос деформации при закалке с цементационного нагрева, но можно полагать, что при такой схеме коробление будет однократным, как в случае с простым цементированием.

Выводы и рекомендации. Полученные в работе числовые данные дают возможность в первом приближении учитывать значение деформации в технологических размерах при проектировании технологических процессов.

Автор полагает, что для учета деформации при составлении технологической размерной цепи необходимо после расчета размера под отделочную обработку цементированной поверхности — «размер окончательный с припуском под отделочную обработку» (размер D_1) — увеличить его дополнительно на 0,15 % при наличии относительно тонкой стенки или на 0,05 % в толстостенных или сплошных сегментах. Такой размер должен быть получен технологическим процессом в детали до цементирования. После цементирования и закалки исходный размер уменьшится и попадет в область рассчитанного размера D_1 , тем самым будет обеспечен стабильный припуск под отделочную обработку и сохранится качество поверхности.

При отработке технологического процесса на производстве размер указанного увеличения необходимо контролировать и корректировать исходя из конфигурации детали и условий конкретного производства.

Данное предложение было реализовано в некоторых действующих технологических процессах на АО «МПО им. И. Румянцева». Это позволило заметно сократить потери деталей из-за коробления. В настоящее время работы по изучению этой проблемы продолжаются.

Литература

- [1] Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
- [2] Токаев Д.Н., Горбунова А.С., Кузнецова Е.В. и др. Расчет деформаций конического зубчатого колеса в процессе термообработки. *Прикладная математика и вопросы управления*, 2016, № 3, с. 51–59.
- [3] Рожков И.И., Мыльникова В.В. Расчет внутренних остаточных напряжений, возникающих в закаленных деталях машин после химико-термической обработки. *Международный журнал экспериментального образования*, 2014, № 1-2. URL: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=4568>
- [4] Сураева А.Ю., Шубина Н.Б. Прогрессивные технологии и оборудование термической обработки цементуемых деталей горных машин. *Научный вестник Московского государственного горного университета*, 2010, № 3, с. 21–27.
- [5] Гуляев А.П. Металловедение. М., Металлургия, 1986.
- [6] Смирнов М.А., Счастливец В.М., Журавлёв Л.Г. Основы термической обработки стали. Екатеринбург, УрО РАН, 1999.
- [7] Бондаренко С.И., Карпенко В.А., Нестеренко Е.А. и др. Характер и причины разрушения шестерён дорожно-строительных и сельскохозяйственных машин. *Вестник ХНАДУ*, 2011, № 54, с. 127–133.
- [8] Морозова Л.В., Орлов М.Р. Усталостное разрушение ведущей конической шестерни газотурбинного двигателя из стали 12Х3НВФМБ. *Сталь*, 2015, № 2, с. 68–71.
- [9] ГОСТ 2.316-2008. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Правила нанесения надписей, технических требований и таблиц на графических документах. Общие положения. М., Стандартинформ, 2009.
- [10] ПИ 1.2.669-2003. Производственная инструкция. Химико-термическая обработка сталей. М., ВИАМ, 2003.

Шаврин Павел Павлович — магистрант кафедры «Металлорежущие станки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер-технолог 1-й категории АО «МПО им. И. Румянцева», Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шаврин П.П. Исследование деформации стальных деталей после цементации и закалки. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 06(47). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-06-617>

THE STUDY OF THE DEFORMATION OF STEEL PARTS AFTER CEMENTATION AND HARDENING

P.P. Shavrin

shav-pasha@yandex.ru

SPIN-code: 3507-1500

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper is devoted to a method for reducing the effect of warping of parts subjected to cementation and hardening on the final dimensions of the parts is considered. The problem is relevant, because it constantly arises in real production. The effect of warping (deformation) on the dimensions of steel parts is investigated. Analysis of the measurement results allowed us to determine the numerical values of the reduction of the linear and diametrical dimensions of the parts. The importance of the study lies in the fact that with known qualitative characteristics of the problem, its numerical indicators, which are important for practical work, are not given in the literature and publications. When calculating technological dimensional chains at the stage of designing a technological process, it is proposed to increase the dimensions of parts before cementing by 0.05 ... 0.20% relative to the nominal technological size in order to reduce defects and improve the operational properties of parts.

Keywords

Technological process, part size, allowance, warping, deformation, cementation, hardening

Received 30.04.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Zinchenko V.M. Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoy obrabotki [Engineering of gear wheels by chemical thermal treatment methods]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001 (in Russ.).
- [2] Tokaev D.N., Gorbunova A.S., Kuznetsova E.V., et al. Calculation of strain bevel gears during heat treatment. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya* [Applied Mathematics and Control Sciences], 2016, no. 3, pp. 51–59 (in Russ.).
- [3] Rozhkov I.I., Myl'nikova V.V. Calculation of inner residual stress appearing in hardened parts after chemical thermal treatment. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*, 2014, no. 1-2. URL: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=4568> (in Russ.).
- [4] Suraeva A.Yu., Shubina N.B. Progressive technologies and the equipment of heat treatment of carburized parts of mining machines. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [Mining Science and Technology], 2010, no. 3, pp. 21–27 (in Russ.).
- [5] Gulyaev A.P. Metallovedenie [Metal science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986 (in Russ.).
- [6] Smirnov M.A., Schastlivtsev V.M., Zhuravlev L.G. Osnovy termicheskoy obrabotki stali [Fundamentals of steel thermal treatment]. Ekaterinburg, UrO RAS Publ., 1999 (in Russ.).

- [7] Bondarenko S.I., Karpenko V.A., Nesterenko E.A., et al. Character and gear failure causes of construction and agricultural machinery. *Vestnik KhNADU* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University], 2011, no. 54, pp. 127–133 (in Russ.).
- [8] Morozova L.V., Orlov M.R. Fatigue destruction of driving bevel gear in gas-turbine engine of 12Kh3NVFMB steel. *Stal'*, 2015, no. 2, pp. 68–71 (in Russ.).
- [9] GOST 2.316-2008. Edinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii (ESKD). Pravila naneseniya nadpisey, tekhnicheskikh trebovaniy i tablits na graficheskikh dokumentakh. Obshchie polozheniya [State standard 2.316-2008. Unified system for design documentation. Rules for placing the inscriptions, technical data and tables of graphical documents. General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2009 (in Russ.).
- [10] PI 1.2.669-2003. Proizvodstvennaya instruktsiya. Khimiko-termicheskaya obrabotka staley [PI 1.2.669-2003. Technical guidelines. Chemical thermal treatment of steels]. Moscow, VIAM Publ., 2003 (in Russ.).

Shavrin Pavel Pavlovich — Master's Degree Student, Department of Machine Tools, Bauman Moscow State Technical University, 1st category industrial engineer, JSC MPO named after I. Rummyantsev, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Shavrin P.P. The study of the deformation of steel parts after cementation and hardening. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 06(47). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-06-617.html> (in Russ.).