

Н.П.ОНИШКОВ, канд. техн. наук, РГСУ

В.И.КОРОТКИН, канд. техн. наук, НИИМиПМ им.И.И.Воровича

К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ НОВИКОВА

Розглядаються умови вибору зміцнювальної поверхні обробки зубчастих передач з зачепленням Новикова та визначення параметрів зміцнювального слою в залежності від модулю передачі та рівню загрузки. На основі аналізу основних форм відмовлення дається попередні рекомендації з вибору раціонального виду термічної або хіміко-термічної обробки.

Термическая или химико-термическая обработка являются непременным элементом технологического процесса изготовления любых ответственных, особенно высоконапряженных зубчатых колес. Уровень нагрузочной способности передач во многом определяется структурой и параметрами упрочненного слоя, которые для традиционных эвольвентных передач регламентированы соответствующими нормативами и стандартами.

Промышленное освоение поверхностно упрочненных передач Новикова поставило на повестку дня разработку аналогичных нормативов, поскольку в силу различия характеристик напряженного состояния и разнообразия параметров исходных контуров этих передач распространение на них нормативов, предназначенных для передач эвольвентных, совершенно необоснованно. В настоящей работе предпринята попытка на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований дать некоторые рекомендации по выбору упрочняющей термической или химико-термической обработке и назначению параметров упрочненного слоя для передач Новикова с исходным контуром по [1].

Прочность деталей, подвергнутых такой обработке, определяется комплексом факторов, и твердость (в отличие от нормализованных или термоулучшенных сталей) уже не является достаточной характеристикой механических свойств материала. В условиях параллельного протекания альтернативных процессов накопления повреждений, каждое из которых характеризуется своеобразным механизмом усталостной долговечности, оптимальный уровень нагрузочной способности обеспечивается только сочетанием

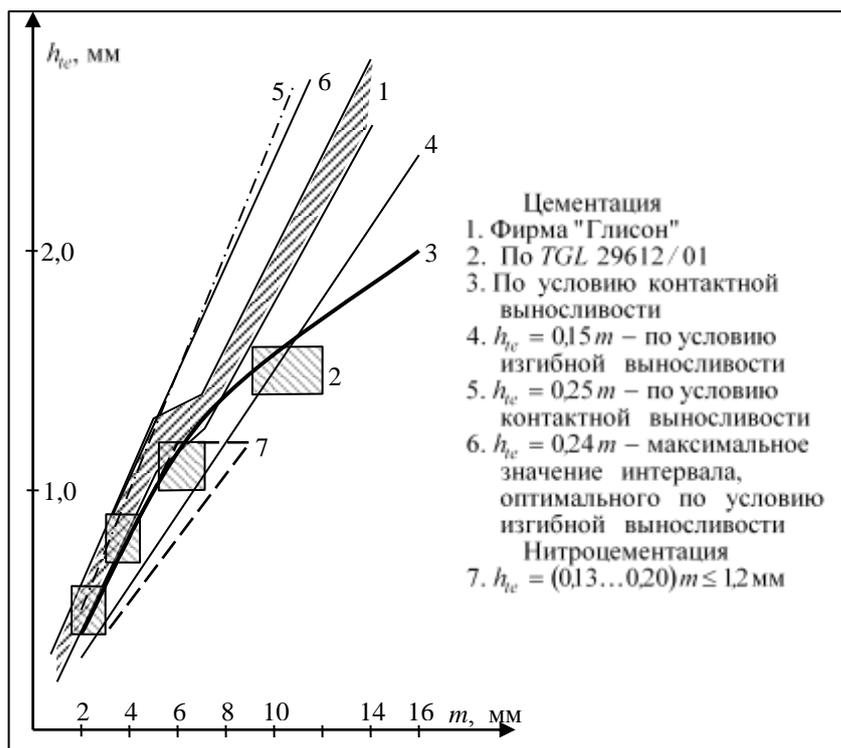


Рис. 1. Рекомендации по выбору толщины диффузионного слоя эвольвентных зубчатых колес

эвольвентных, ширина корня зуба [1] и позволяет в первом приближении ориентироваться на верхнюю границу указанного промежутка.

Как и в эвольвентных передачах, параметром, на который следует ориентироваться при выборе вида и характеристик упрочнения, является модуль. Для передач Новикова его использование даже более обосновано, поскольку в этом случае модуль «отвечает» не только за уровень изгибных, но и контактных напряжений. Анализ несущей способности упрочненного слоя проводим по показателям глубинной контактной прочности (ГКП), т.к. в условиях высоких контактных нагрузок и значительной глубины

прочности поверхности, сердцевини и толщины упрочненного слою. Увеличение толщины слою, как правило, положительно сказывается на показателях контактной прочности (как поверхностной, так и глубинной). Фактором, ограничивающим глубину упрочнения зубьев, является изгиб. Оценка влияния толщины слою ориентировочно производится на основе известного решения об упруго-пластическом изгибе бруса. Применительно к зубчатым передачам это решение дает рекомендацию по выбору толщины слою: $0,2 \leq h_{te} / (0,25\pi m) \leq 0,3$, т.е. $h_{te} = (0,15...0,24)m$. Как видно из рис.1, существующие нормативы (для эвольвентных передач) до $m = 10,0$ в основном укладываются в этот интервал [2, 3]. Существенно большая, чем у традиционных

залегания максимальных критериальных напряжений этот вид отказа определяет наибольшую (по сравнению с альтернативными) толщину слоя. Поверхностные контактные разрушения, как показывает опыт эксплуатации и стендовые испытания [4] (при σ_{Kmax} до 2100МПа), лимитирующим фактором не являлись. Основными причинами отказов были изломы, в т.ч. на фоне развивающейся глубинной контактной трещины, а также краевые сколы.

Для передач с исходным контуром по ГОСТ30224-96 при $\beta < 25^0$ коэффициент эллиптичности $\beta = b_H/a_H$ (b_H и a_H соответственно малая и большая полуоси контактного эллипса) не превышает 0,3, и с достаточной для практических расчетов точностью b_H определяется из зависимости

$$b_H = mR \sigma_H \text{ (мм)},$$

где m (мм), σ_H (МПа),

$$R = \begin{cases} 1,107 \cdot 10^{-4}, & 2,5 \leq m < 5,0; \\ 1,391 \cdot 10^{-4}, & 5,0 \leq m \leq 8,0; \\ 2,031 \cdot 10^{-4}, & m > 8,0. \end{cases}$$

Анализ показателей ГКП проводился на основе критерия предельного состояния Писаренко – Лебедева для структурно неоднородных материалов по методике [5, 6] и заключался в определении в пределах всей толщины упрочненного слоя расчётного коэффициента запаса S_{HK} :

$$S_{HK} = \frac{\sigma_{HKPe}}{\chi \sigma_i + \chi A^{1-\sigma_+/\sigma_-} \sigma_i}$$

где $\sigma_{HKPe} = \chi \cdot 0,11128 \cdot \bar{H}_{HV} \cdot Z_{HL} \cdot \prod_{i=1}^6 K_i$ – допустимые эквивалентные напряжения при базовом числе циклов нагружения $N_{EK} = 10^7$; $\chi = \sigma_+/\sigma_-$ – параметр пластичности материала, учитывающий степень участия в микроразрушении сдвиговых деформаций; σ_+, σ_- – напряжения отказа (разрушения) материала при одноосном растяжении и сжатии; A – статистический параметр дефектности, его значение для закалённых сталей: $A = 0,7 \div 0,8$; $\prod_{i=1}^6 K_i$ коэффициенты, учитывающие факторы оказывающие

существенное влияние на несущую способность контакта, но не связанные с расчётной моделью [5];

$Z_{HL} = \left(\frac{10^7}{N}\right)^{1/\mu}$.

Цементация и нитроцементация. Корректность результатов во многом определяется степенью достоверности прогнозирования распределения твердости по толщине упрочненного слоя. Несущая способность упрочненного слоя определяется максимальной твердостью приповерхностной зоны H_0 , находящейся на глубине $h_0 = 0,15...0,30$ мм твердостью сердцевины H_k , а также h_{te} – эффективной толщиной слоя – расстоянием от поверхности до глубины с заданным уровнем твердости H_e . Чаще всего $H_e = HV 550$. Общая толщина h_t слоя, как правило, не контролируется вследствие ее «размытости». Несмотря

на это, $H_Z = H_0 \left[\left(\frac{H_0}{H_k} - 1 \right) \left(\frac{z}{h_t} \right)^2 + 1 \right]^{-1}$ – зависимость, используемая в ГОСТ 21354-87,

«привязана» к h_t , но не к контролируемой эффективной толщине слоя. Это, как правило, ведет к завышению расчетных значений твердости в подслое. Лучшее согласование дает зависимость [7]:

$$H_Z = H_0 - H_k \left[\frac{h_t - z}{h_t - h_0} \exp\left(\frac{z - h_0}{h_t - h_0}\right) \right]^B + H_k,$$

$$B = \ln\left(\frac{H_0 - H_k}{H_e - H_k}\right) \cdot \left(\ln \frac{h_t - h_0}{h_t - h_{te}} - \frac{h_{te} - h_0}{h_t - h_0} \right)^{-1}$$

Рекомендуемые значения H_e

для цементации ~ HV 550, для нитроцементации ~ HV 610.

Нагрузочная способность эквивалентных цементованных и нитроцементованных слоев нормативно оценивается как приблизительно одинаковая, что, однако, не подтверждается практикой. Для передач Новикова это отличие весьма существенно. При одном и том же уровне твердости (и качестве ХТО) нитроцементованные слои более пластичны. Однако интенсивность снижения твердости в подслое при нитроцементации выше, чем при цементации. В этом, на наш взгляд, одна из причин повышенной чувствительности нитроцементованных слоев к колебаниям твердости сердцевины.

Результаты проведенных расчетов приведены на рис.2 и 3, где показаны типичные графики распределения твердости по толщине цементованных и нитроцементованных слоев и соответствующие этим распределениям расчетные коэффициенты запаса по ГКП. Для всех случаев принималось $H_0 = 700 HV$. Твердость сердцевины – H_k : (300...350) HV при цементации и (350...400) HV при нитроцементации

Возможность получения при цементации слоев достаточно большой толщины позволяет произвести оценку несущей способности слоя, нормируя его глубину по b_H : $z_0 = z/b_H$, $h_{e0} = h_e/b_H$. При

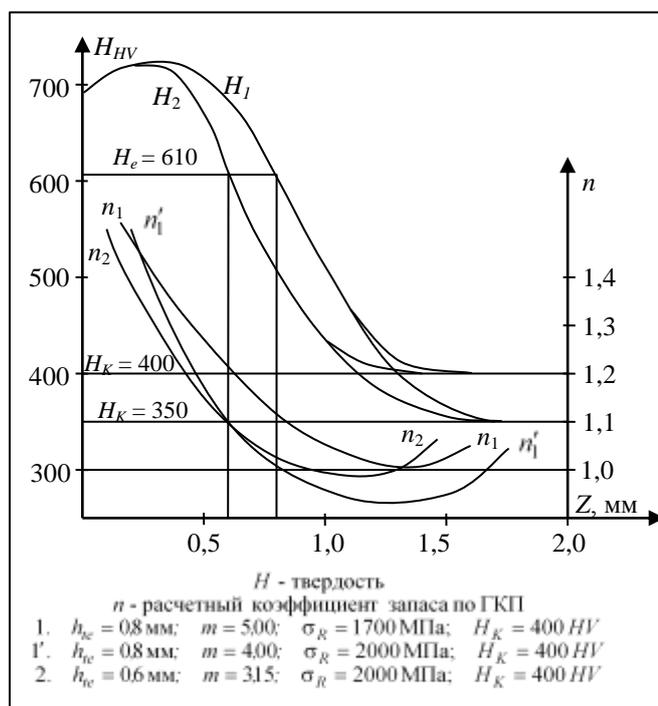


Рис. 2. Распределение твердости и показателей ГКП нитроцементованного слоя.

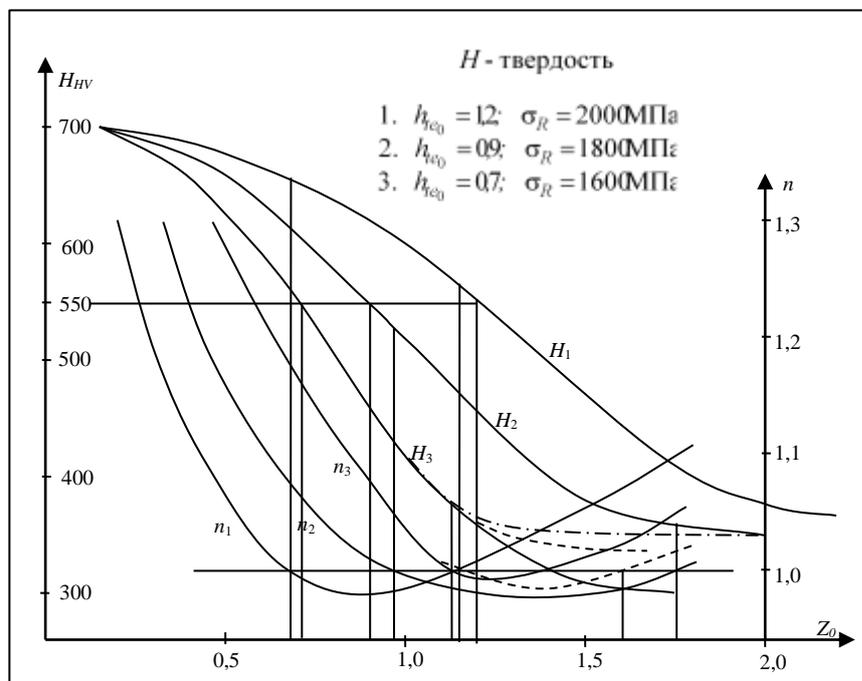


Рис. 3. Распределение твердости и показателей ГКП

нитроцементации толщина слоя ограничена и в меньшей степени связана с h_{e0} . Поэтому исследовалась несущая способность слоя при $h_{e0} = 0,6$ мм и $h_{e0} = 0,8$ мм ($H_e = 610 HV$).

В условиях ограниченной толщины слоя при нитроцементации, факторами, определяющими предельный уровень нагрузочной способности, являются модуль и твердость сердцевины. Так, для передач $m = 3,15$ мм с $H_k = 400 HV$ и $h_{e0} = 0,6$ мм – $\sigma_K = 2000$ МПа. Уменьшение H_k до 350 HV ведет к снижению σ_K на

(8...10)% или на (25...30)% нагрузочной способности. Для передач $m = 5,0$ даже увеличение h_{te} до 0,8 мм не гарантирует работоспособности при $\sigma_K > 1600$ МПа, уступая цементации.

При цементации влияние твердости сердцевины сказывается в меньшей степени. Максимальная несущая способность, ограничиваемая прочностью эффективной зоны: $\sigma_K = (1900...2000)$ МПа при $h_{te} > 1,2b_H$. При слоях меньшей толщины лимитирует прочность подслоя, и высокая нагрузочная способность собственно эффективной зоны не реализуется. На рис.4. приведены расчетные значения b_H для различных σ_K и максимально возможная (в рамках вышеприведенного интервала) величина $h_{te} = 0,24m$ ($H_e = HV 550$).

Анализ графиков показал следующее. С учетом возможных колебаний фактической толщины слоя $\Delta h = 0,1...0,3$ мм для мелко модульных передач возможна их эксплуатация на уровне $\sigma_K = (1800...2000)$ МПа, для передач средних модулей σ_K не должно превышать 1700 МПа, а при $m > 8$

применение ХТО с целью достижения максимальной нагрузочной способности теряет смысл.

Азотирование. В силу малой толщины упрочненного слоя его влияние может сказываться только на передачах малого модуля. Уже при $m = 3,15$ мм и $\sigma_K = 1400$ МПа – $b_H > 0,5$ мм, и предельная нагрузочная способность будет определяться прочностью сердцевины.

Поверхностная закалка. Возможность получения слоев достаточно большой толщины в определенной степени обесценена наличием переходной зоны (области, прогретой до температур $A_{c1} < t < A_{c3}$) со значительной структурной неоднородностью и резким падением твердости. Кроме того, при

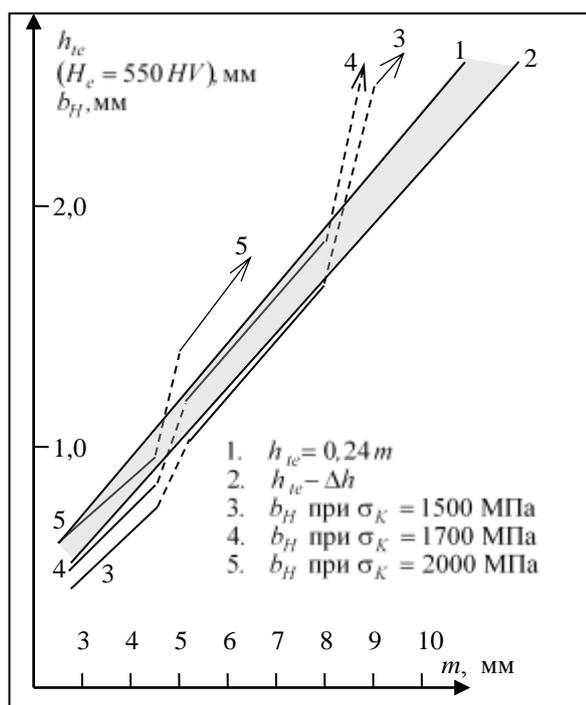


Рис. 4. Влияние модуля цементованных передач [1] на уровень допускаемой нагрузки по условиям изломной прочности.

поверхностной закалке термоулучшенных сталей возможно локальное снижение твердости ($H < H_K$) при переходе к сердцевине вследствие отпуска. Наиболее перспективным в этом отношении представляется использование закалки с глубинного индукционного нагрева среднеуглеродистых сталей пониженной прокаливаемости. На рис.5 приведена кривая распределения твердости стали 55ПП после закалки с глубинного индукционного нагрева [8] и типичные кривые распределения твердости после цементации (сталь типа 18ХГТ) и поверхностной закалки ТВЧ (сталь типа 50), имеющие одинаковую реперную точку $H = HV 550$ на глубине 1,9 мм. Кривая 4 соответствует минимальным значениям твердости переходной зоны по условиям ГКП для передачи Новикова по ГОСТ30224-96 $m = 8$ мм при $\sigma_{Kmax} = 1700$ МПа; $h_{te} = 0,2375m$. Очевидно, требуемый уровень нагрузочной способности гарантирован быть не может. Вместе с тем необходимо отметить, что приведенное распределение твердости было получено на эвольвентном колесе $m = 6$, т.е. толщина слоя с твердостью выше $HV 550$ почти на 30% превышала верхний уровень h_{te} при цементации без каких либо негативных последствий. Поэтому для рассматриваемых передач Новикова допустимо $\sigma_{Kmax} = 1800$ МПа. К сожалению, данный вид ТО до сих пор объектом исследований не являлся и судить об его эффективности можно только гипотетически.

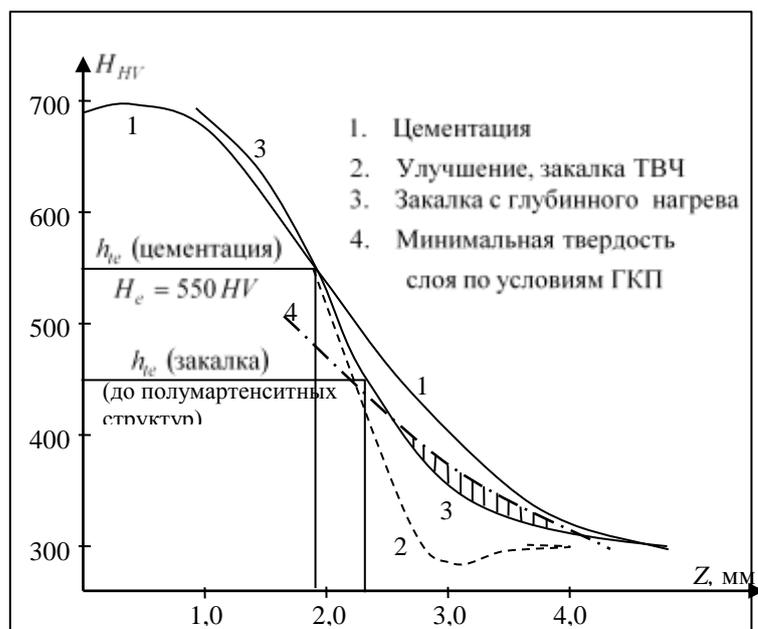


Рис. 5. Несущая способность подслоя в зависимости от вида поверхностного упрочнения

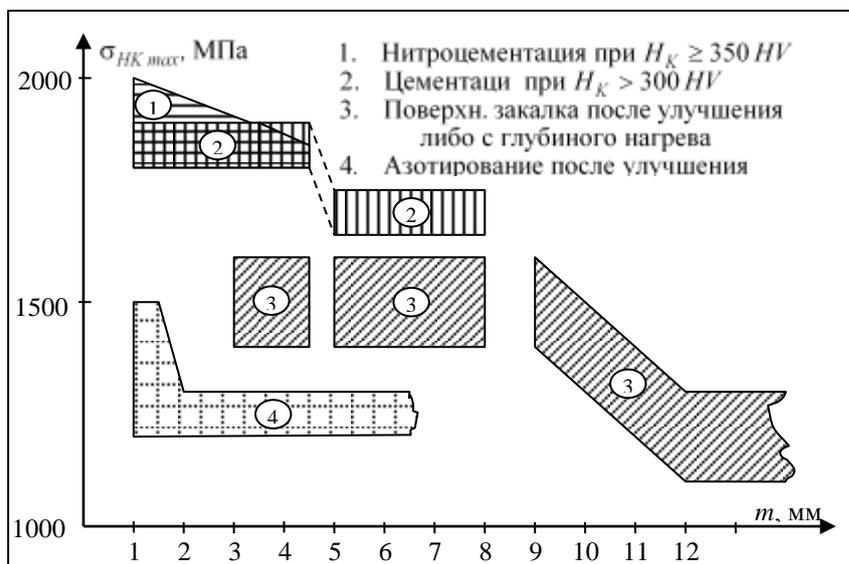


Рис. 6. Рекомендуемые виды термической и химико-термической обработки зубчатых передач Новикова с исходным контуром по ГОСТ 30224-96

Для передач с $m > 8$ поверхностное упрочнение будет связано с альтернативными видами отказов (износ, задир и т.д.), но не с максимальной контактной прочностью, поскольку получение для таких передач упрочненных слоев оптимальных параметров технологически труднодостижимо и экономически неоправданно. Поэтому, как и при азотировании мелко модульных передач, уровень ГКП будет определяться прочностью сердцевины.

А поскольку эффект упрочнения сердцевины положительно сказывается и на изломной прочности [8,9], причем тем сильнее, чем меньше относительная толщина упрочненного слоя, то ориентироваться следует по нижней границе интервала h_{ce} .

Таким образом, все рассмотренные методы термического либо химико-термического упрочнения, применяемые для эвольвентных передач, могут быть применены и к передачам Новикова. Для передач с исходным контуром по ГОСТ30224-96 возможные рекомендуемые виды ТО (ХТО) в зависимости от модуля и σ_{Kmax} (для числа циклов 10^7) представлены на рис.6.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 06-08-00454.

2. *Зинченко В.М.* Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд.-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001. 302 с. 3. Технология термической обработки стали. М.: Машиностроение. 1981. 607 с. 4. *Веретенников В.Я., Короткин В.И., Болдырева Л.Г.* Исследование нитроцементованных цилиндрических зубчатых передач Новикова для редукторов общего назначения // Вестник машиностроения. 1984. № 6. С.21-23. 5. *Короткин В.И., Онишков Н.П.* О глубинной контактной прочности поверхностно-упрочненных зубчатых передач Новикова // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. №1. С. 42-46. 6. *Онишков Н.П.* Местное напряженное состояние и оценка глубинной контактной прочности поверхностно упрочненных зубчатых передач Новикова. Дисс. канд. техн. наук. Харьков. 1991. 164 с. 7. *Онишкова В.М. Онишков Н.П.* К расчету цементованных зубьев на глубинную прочность. // Обеспеч. надежн. и долговечн. зубчатых передач на стадии изготовления. Тез. докл. респ. научно-техн. конф. Севастополь. 1989. С.19-20. 8. *Шепеляковский К.З.* Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при глубинном нагреве. М.: Машиностроение. 1972. 288с. 9. *Головин Г.Ф., Замятин М.М.* Высокочастотная термическая обработка. Л.: Машиностроение. 1990. 239 с.

Поступила в редакцию 17.04.2007