

УДК 621.002:539.3(075.8)

**В. И. Бутенко**, д-р техн. наук, профессор; **Ю. В. Корольков**, канд. техн. наук, доцент  
Донской государственной технической университет, Россия  
Тел.: +7(928)600-57-61; E-mail: [butenkowiktor@yandex.ru](mailto:butenkowiktor@yandex.ru)

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

*Исследовано изменение величины технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя детали, подвергнутой отделочно-упрочняющей обработке, от температуры эксплуатации. Показано, что температурная устойчивость технологических остаточных напряжений зависит от химического состава материала и условий эксплуатации детали. Доказано, что величина технологических остаточных напряжений пропорциональна удельной накопленной энергии деформации в материале поверхностного слоя детали*

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, поверхностный слой, отделочно-упрочняющая обработка, удельная накопленная энергия деформации.

**V. I. Butenko, Y. V. Korolkov**

## TEMPERATURE STABILITY OF TECHNOLOGICAL RESIDUAL STRESS IN THE PARTS SURFACE LAYER MATERIAL

*The change in the value of technological residual stresses in the material of the part surface layer subjected to finishing and hardening treatment from the operating temperature has been investigated. It is shown that the thermal stability of technological residual stresses depends on the material chemical composition and the part operating conditions. It is proved that the value of technological residual stresses is proportional to the specific accumulated deformation energy in the material of the part surface layer.*

**Keywords:** residual stresses, surface layer, finishing and hardening treatment, specific accumulated deformation energy.

### 1. Введение

В современном машиностроительном производстве в подавляющем большинстве случаев технологические процессы механической обработки деталей предусматривают финишные операции, при выполнении которых в материале поверхностного слоя детали формируются технологические остаточные напряжения, оказывающие в дальнейшем существенное влияние на эксплуатационные свойства детали. В качестве финишных операций при обработке деталей машин очень часто назначают шлифование или отделочно-упрочняющую обработку. Известно [1], что эти способы финишной обработки создают в поверхностном слое детали разные по знаку, величине и глубине распространения технологические остаточные напряжения. В процессе эксплуатации детали могут подвергаться нагреву, который влияет не только на величину технологических остаточных напряжений, но и характер распределения их по толщине поверхностного слоя. Поэтому исследования температурной устойчивости технологических остаточных напряжений, созданных в материале поверхностного слоя в процессе финишной обработки детали, имеют научную и практическую значимость.

### 2. Основное содержание и результаты работы

Проведены экспериментальные исследования влияния температуры на изменения величины технологических остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ , созданных в материале поверхностного слоя втулок с наружным диаметром 42 мм, внутренним диаметром 36 мм и длиной 20 мм, прошедших предварительную чистовую токарную обработку на станке мод. 1И611П и последующую обкатку упрочняющим роликом диаметром 40 мм,

© Бутенко В.И., Корольков Ю.В.; 2022 г.

радиусом рабочего профиля 12 мм из закалённой быстрорежущей стали Р6М5. Втулки были изготовлены из сталей 10, 12ХН3А и сплава 45Х25Н20С2А. Величина технологических остаточных напряжений определялась по методике Н. Н. Давиденкова [2] и принималась как среднеарифметическая по десяти последовательно выполненным измерениям. Начальные значения технологических остаточных напряжений достигались в процессе обкатки их поверхностей роликом с усилием  $P = 750$  Н, подачей  $S_{мин} = 0,01$  м/с за три прохода. Для исследований отбирались втулки, у которых технологические остаточные напряжения отличались от их среднеарифметического значения не более, чем на  $\pm 5$  МПа. При этом диапазон изменения параметра шероховатости  $Ra$  обработанных поверхностей втулок составлял  $Ra = (1,6 - 2,0)$  мкм.

Нагрев каждой партии исследуемых втулок после обкатки их наружных поверхностей роликом осуществлялся в лабораторном сушильном шкафу мод. СМ50/250-250ШС в течение 60 мин. с интервалами температур  $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$ . Одновременно в сушильный шкаф помещали 10 предварительно обработанных втулок. Для каждой партии исследуемых образцов устанавливалась своя температура нагрева. Технологические остаточные напряжения  $\sigma_{ост}$  определялись после охлаждения на воздухе исследуемых втулок до температуры  $20^\circ\text{C}$ .

Результаты выполненных исследований представлены на рис. 1, из которого следует, что для каждой марки стали или сплава в функциональной зависимости  $\sigma_{ост} = f(\theta)$  есть критическая температура нагрева  $\theta_{кр}$ , выше которой величина сформированных в процессе упрочняющей обработки материала поверхностного слоя детали технологических остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  резко уменьшается. При этом для сталей и

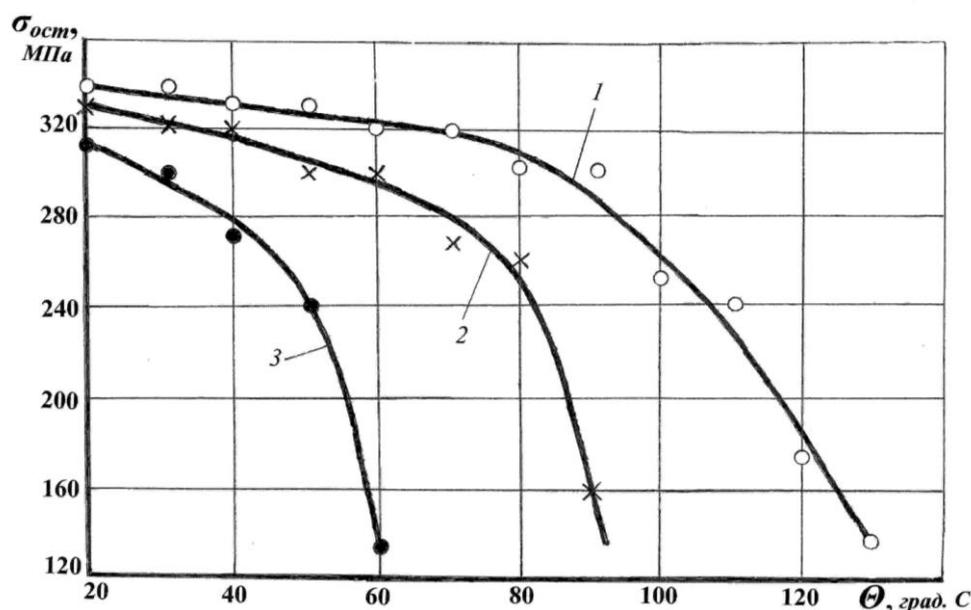


Рисунок 1. Изменение величины технологических остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  в материале поверхностного слоя втулок от температуры нагрева  $\theta$ : 1 – сплав 45Х25Н20С2А; 2 – сталь 12ХН3А; 3 – сталь 10.

сплавов, легированных хромом и никелем (кривые 1, 2), значение критической температуры  $\theta_{кр}$  значительно выше, чем для малоуглеродистых нелегированных сталей (кривая 3). В связи с этим были проведены исследования по ранжированию температурной

устойчивости технологических остаточных напряжений у наиболее распространённых сталей и сплавов, используемых в современном машиностроении.

Критерием для ранжирования исследуемых железоуглеродистых сплавов по критической температуре нагрева  $\Theta_{кр}$  было принято снижение величины технологических остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  на 20% в течение 60 мин непрерывного нагрева.

Результаты выполненных исследований приведены на рис. 2, из которого следует, что упрочняющую обработку поверхностного слоя целесообразно проводить для деталей, изготавливаемых из высоколегированных сталей и сплавов с высоким содержанием хрома и никеля. Детали из этих сталей и сплавов обычно эксплуатируются при повышенных температурах.

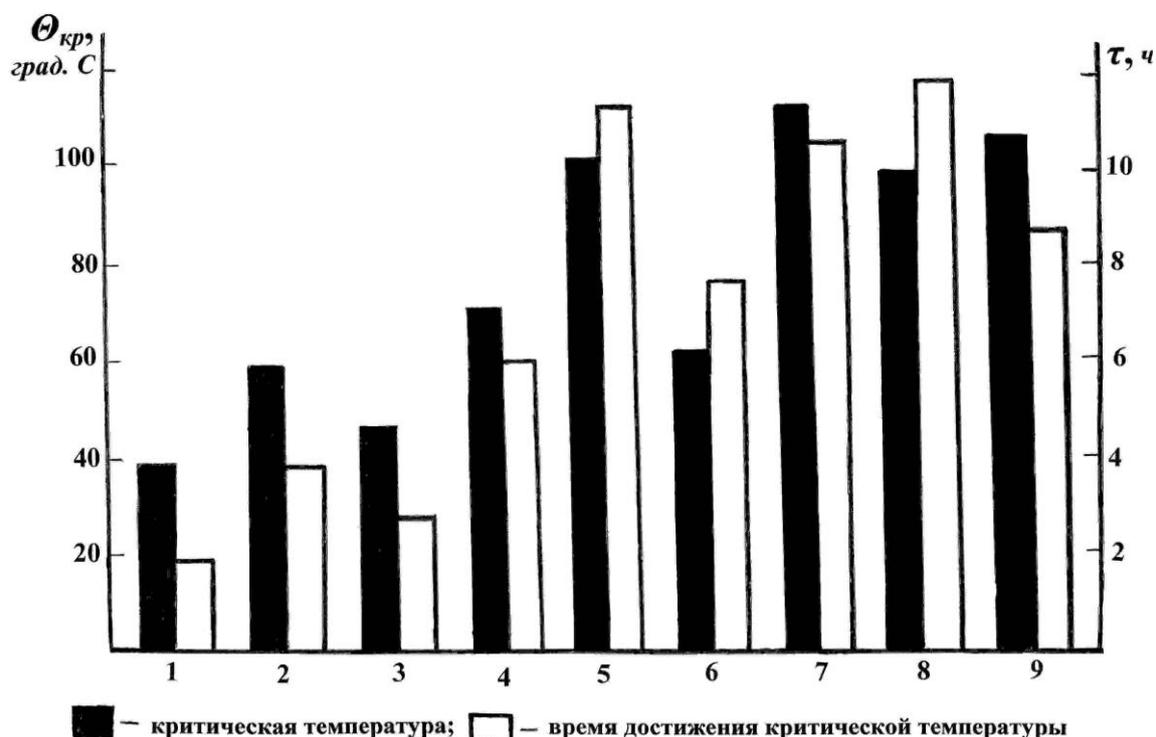


Рисунок 2. Ранжирование сталей и сплавов по температурной устойчивости технологических остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ : 1 – сталь 10; 2 – сталь 12ХН3А; 3 – сталь 38ХМЮА; 4 – сталь 50ХН; 5 – сталь 110Г13Л; 6 – сплав 45Х25Н20С2А; 7 – сплав ХН70ВМТЮ; 8 – сплав ЖС26ВСНК; 9 – сплав ЖС6У

Для выявления причин снижения величины технологических остаточных напряжений при нагреве деталей были проведены сравнительные исследования температурной устойчивости технологических остаточных напряжений по абсолютной величине  $|\sigma_{ост}|$ , полученных на плоских образцах из стали 12ХН3А размером  $B \times H \times L = 20 \times 2 \times 200$  мм после шлифования на плоскошлифовальном станке мод. 3Е711ВФ1 и обкатки упрочняющим роликом на вертикально-фрезерном станке мод. 6Т13 по способу, описанному в работе [3]. Определение  $|\sigma_{ост}|$  производилось после каждого увеличения температуры нагрева на  $\Delta\Theta = 10^\circ\text{C}$  и продолжительности нагрева 60 мин.

Представленные на рис. 3 результаты исследований свидетельствуют о том, что температурная устойчивость технологических остаточных напряжений сжатия после упрочняющей обработки (рис. 3, кривая 1) выше температурной устойчивости техноло-

гических остаточных напряжений растяжения, сформировавшихся в процессе шлифования (рис. 3, кривая 2). Было сделано предположение о том, что такое расхождение в температурной устойчивости технологических остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  связано с особенностями энергетического состояния материала поверхностного слоя детали, созданного в процессе отделочно-упрочняющей обработки и шлифования. Действительно, согласно исследованиям, выполненным в работах [4, 5], эффективность того или иного внешнего воздействия на поверхность обрабатываемой детали зависит от скорости изменения плотности внутренней энергии  $\mathcal{E}(\Delta H, t)$  в элементе материала поверхностного слоя определяемый по формуле:

$$\mathcal{E}(\Delta H, t) = \mathcal{E}(\Delta H, 0) + \sum_{i=1}^N \int_0^t \mathcal{E}_i(\Delta H_i, t_i) dt,$$

где  $\mathcal{E}(\Delta H, 0)$  – плотность внутренней энергии в элементе материала поверхностного слоя в исходном состоянии;

$\mathcal{E}_i(\Delta H_i, t_i)$  – скорость изменения плотности внутренней энергии в элементе материала поверхностного слоя при единичном внешнем воздействии (например, проходе шлифовального круга или упрочняющего ролика);

$N$  – число единичных воздействий на обрабатываемую поверхность детали за время  $t$ .

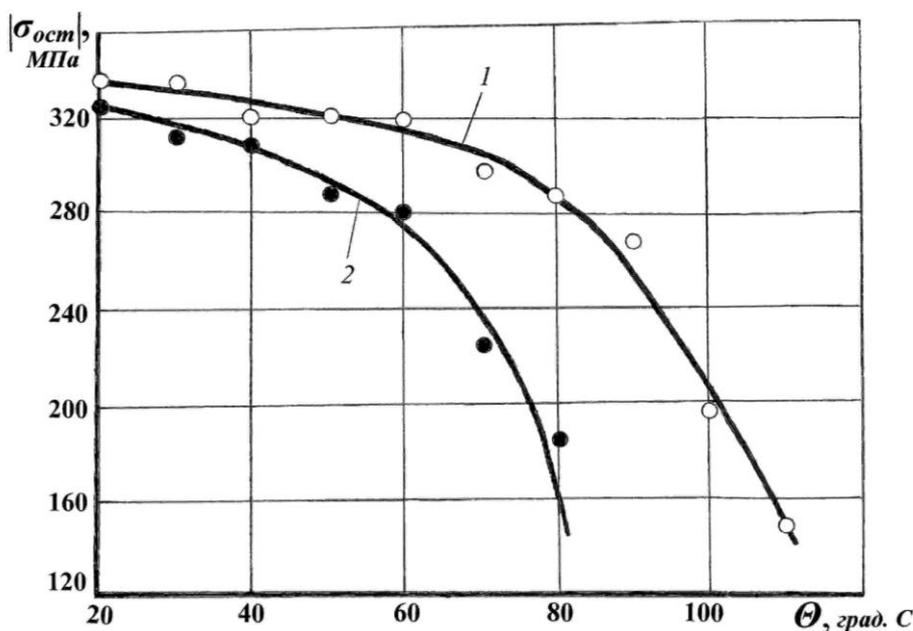


Рисунок 3. Изменение величины технологических остаточных напряжений  $|\sigma_{ост}|$  в материале поверхностного слоя втулок от температуры нагрева  $\Theta$  упрочнённых (кривая 1) и шлифованных (кривая 2) поверхностей втулок из стали 12ХНЗА.

Если принять плотность внутренней энергии в материале поверхностного слоя  $\mathcal{E}(\Delta H, 0) = const$  при различном характере внешнего воздействия на обрабатываемую деталь, то скорость изменения плотности внутренней энергии  $\mathcal{E}_i(\Delta H_i, t_i)$  после прохода шлифовального круга или упрочняющего ролика будет пропорциональна удельной накопленной энергии деформации в материале поверхностного слоя  $\mathcal{E}_{уд}$ . Экспериментально величина  $\mathcal{E}_{уд}$  после каждого прохода шлифовального круга или упрочняющего ролика может быть определена на установке, использующей метод дифференциальной сканирующей калориметрии [5, 6].

На рис. 4 приведены гистограммы изменения накопленной энергии деформации  $\mathcal{E}_{уд}$  в материале поверхностного слоя деталей в течение трёх проходов шлифовального круга и упрочняющего ролика, из анализа которых следует, что величина  $\mathcal{E}_{уд}$  при обкатке поверхности роликом выше, чем при шлифовании. Следовательно, согласно выше приведённой формулы при отделочно-упрочняющей обработке скорость изменения плотности внутренней энергии  $\mathcal{E}(\Delta H, t)$  в элементе материала поверхностного слоя выше, чем при шлифовании. Это обуславливает более высокую температурную устойчивость технологических остаточных напряжений сжатия.

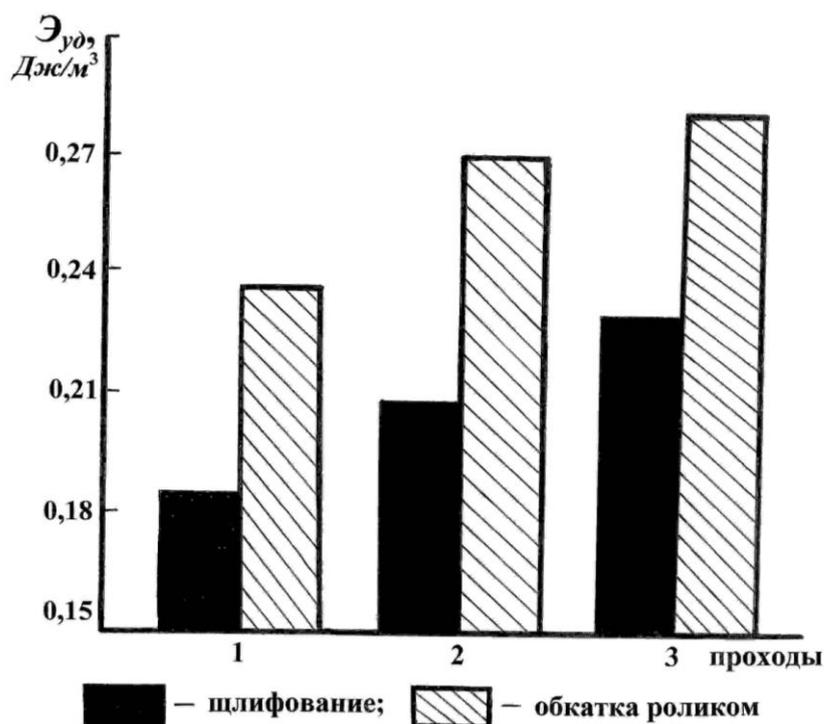


Рисунок 4. Гистограммы изменения удельной накопленной энергии деформации  $\mathcal{E}_{уд}$  в материале поверхностного слоя деталей в зависимости от способа обработки и числа проходов инструмента

Исследования показали, что показателем температурной устойчивости технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя деталей является температурно-временная характеристика  $\Theta-t$ , зависящая как от химического состава материала деталей и принятого способа финишной обработки их поверхностей, так и условий эксплуатации. В табл. 1 приведены значения температурно-временных харак-

Таблица 1. – Значения температурно-временных характеристик  $\Theta-t$  для сталей и сплавов, град.С×ч

Способ обработки	Сталь 12ХН3А	Сталь 30ХГСА	Сталь 38ХМЮА	Сплав 45Х25Н20С2А	Сплав ХН70ВМТ Ю
Шлифование	1250	1380	1180	2360	2660
Обкатка роликом	1570	1720	1410	2730	3050

теристик  $\Theta-t$  для некоторых легированных сталей и сплавов, широко используемых в двигателестроении, нефтегазоперерабатывающем машиностроении, при создании машин и механизмов для горнодобывающей промышленности. Приведённые в табл. 1 значения температурно-временных характеристик  $\Theta-t$  получены экспериментальным путём для критерия снижения величины технологических остаточных напряжений 20%. Они свидетельствуют о том, что упрочняющая обработка поверхностей деталей машин позволяет на 15-20% повысить температурно-временные характеристики сталей и сплавов. Исследования показали, что наличие в материале поверхностного слоя деталей технологических остаточных напряжений сжатия также позволяет в процессе эксплуатации повысить характеристику  $\Theta-t$ . В связи с этим возникает необходимость в создании банка данных температурно-временных характеристик для конструкционных материалов, используемых в современном машиностроительном производстве.

### 3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования указывают на необходимость учитывать при выборе способа финишной обработки поверхностей деталей температурную устойчивость создаваемых в материале поверхностного слоя технологических остаточных напряжений, величина которых зависит от химического состава материала деталей и условий их эксплуатации в изделии. Перспективным является дальнейшее исследование температурно-временных характеристик конструкционных материалов с целью формирования справочных данных по выбору их для деталей, эксплуатируемых при высоких температурах и давлениях.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бутенко, В. И. Финишная обработка поверхностей деталей: способы, устройства, инструменты / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2016. – 219 с.
2. Давиденков, Н. Н. Динамические испытания металлов / Н. Н. Давиденков. – М.: ОНТИ, 1936. – 536 с.
3. Бутенко, В. И. Отделочно-упрочняющая обработка деталей: технологии и их эффективность / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2022. – 220 с.
4. Лебедев, В. А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования / В. А. Лебедев. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2006. – 183 с.
5. Бутенко, В. И. Технологическая совместимость функциональных слоёв и покрытий / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2020. – 169 с.
6. Бутенко, В. И. Установка для определения энергетического состояния материала поверхностного слоя детали / В. И. Бутенко, К. В. Давиденко, Т. С. Сосницкая // Инженер. Студ. науч.-техн. журнал. – 2019. – №2(28). – Донецк: Изд-во ДонНТУ. – С. 24 – 28.

Поступила в редколлегию 02.03.2022 г.