

## НЕКОТОРЫЕ СООБРАЖЕНИЯ О МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ШЛИФОВОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТРЕЩИН

Лебедев В.Г., докт. техн. наук, проф., Клименко Н.Н., канд. техн. наук, доц.  
(Одесский национальный политехнический университет)

*Рассматриваются вопросы аналитического и экспериментального определения термодинамических явлений при шлифовании закаленных сталей. Рассматриваются закономерности формирования остаточных напряжений и трещин поверхностного слоя шлифуемой детали.*

**Введение.** Опыт шлифования деталей, изготовленных из цементированных и закаленных сталей, а также деталей, поверхность которых была подвержена поверхностной закалке, показывает, что весьма распространенным видом брака при этой операции являются тепловые дефекты, вызываемые высокой контактной температурой шлифования – прижоги и трещины поверхностного слоя.

**Задача исследования** – используя аналитические и экспериментальные возможности, создать модель или математическое описание механизма образования шлифовочных напряжений и трещин.

**Исследования.** Наиболее часто тепловые шлифовочные дефекты образуются у цементруемых, улучшаемых высокоуглеродистых сталей, низко и средне легированных, со структурой мартенсита или отпущенного мартенсита [2,4,5,6], При быстром нагреве температурой шлифования поверхности шлифуемой детали из закаленной стали выше линии  $A_{c1}$  мартенситная структура поверхностного слоя переходит в аустенитную структуру, то есть имеет место обратное мартенситное превращение. Это превращение тем более облегчается, что в результате больших удельных давлений, оказываемых абразивными зернами на поверхность металла, точка  $A_{c1}$  снижается в область более низких температур [1].

После быстрого нагрева поверхностного слоя следует его быстрое охлаждение со скоростями, значительно превышающими критические скорости закалки. Точки  $M_k$  у этих сталей в большинстве своем находятся ниже  $20^\circ\text{C}$ , то есть ниже температуры, до которой охлаждается металл при шлифовании. В результате этого мартенситные превращения происходят не полностью, вследствие чего в поверхностном слое фиксируется структура аустенита вторичной закалки, получившая название шлифовочного прижога закалки.

В принципе образование прижогов закалки при шлифовании может быть объяснено тем, что в процессе охлаждения аустенитной структуры подавляется распад аустенита в области сравнительно высоких температур, в результате чего в структуре отсутствует троостит и сорбит. Окончательное охлаждение аустенитной структуры происходит в интервале температур от  $100$  до  $20^\circ\text{C}$ , то есть процесс охлаждения заканчивается между точками  $M_n$  и  $M_k$ , таким образом температурный интервал до конца мартенситного превращения не пере-

крывается, что обуславливает неполноту этого превращения и фиксацию значительной части аустенита.

Быстрый и неравномерный нагрев поверхностных слоев, а также быстрое их охлаждение способствует образованию в них растягивающих напряжений значительных величин. При фазово-структурных изменениях в поверхностном слое вследствие разной плотности фаз и структур создаются особенно благоприятные условия для образования больших внутренних напряжений и трещин.

В производственной практике трещины появляются периодически, причем часто при шлифовании одной и той же марки стали при одних и тех же режимах. Все это заставляет предположить, что причиной образования трещин являются факторы металлургического-термического порядка и чисто технологические, связанные с режимом обработки. К металлургическо-термическим причинам могут быть отнесены следующие факторы:

- а) начальное распределение структур в поверхностном слое заготовки;
- б) начальное распределение напряжений в поверхностном слое заготовки, образующихся после термической обработки, в случае, если температура шлифования ниже температуры отжига для снятия напряжений;
- в) расположение интервала мартенситного превращения на шкале температур;
- г) содержание свободных карбидов;
- д) содержание углерода в мартенсите;
- е) величина критических температур для данной стали, в частности, температуры третьего превращения отпуска  $T_{3отп}$  и температуры аустенитизации  $T_A$ .

К технологическим причинам могут быть отнесены:

- а) величина контактной температуры шлифования, через которую опосредуется режим шлифования;
- б) сила резания  $P_z$ , через которую также опосредуется режим шлифования;
- в) факторы, влияющие на первые две величины: марка абразивного круга, состояние рабочей поверхности круга режимы резания - скорость вращения круга  $V_{кр}$ , скорость детали относительно заторможенного круга  $V_u$ , глубина шлифования  $t$ , ширина шлифования на данном проходе  $h$ .

Кроме того, влияет также применяемая СОЖ и тщательность балансировки шлифовального круга.

Температура рекристаллизации  $T_{рекр}$  углеродистых сталей ориентировочно может быть принята как  $1010^\circ\text{C}$ . Таким образом, если температура шлифования достигает этой величины, то происходит местный рекристаллизационный отжиг шлифуемой поверхности, что в принципе исключает ее наклеп. Если температура шлифования достигает величины примерно  $0,4 \cdot T_{рекр}$ , то происходит так называемый отжиг для снятия внутренних напряжений, что также исключает фиксацию напряжений наклепа.

Необходимо отметить также, что температура поверхности должна быть больше или равна  $0,4 \cdot T_{рекр}$  полностью или в значительной степени снимает предыдущие напряжения, вызываемые термообработкой, которые или совсем не влияют на напряженное состояние поверхностного слоя после шлифования или же влияют крайне незначительно.

Если деформация происходит при температуре ниже этой, то должен происходить наклеп поверхности, что сопровождается формированием напряжения сжатия. Следует, однако, учитывать, что такой низкий уровень температуры шлифования (несколько ниже  $400^{\circ}\text{C}$ ), может быть достигнут только при мягких режимах обработки, что характерно для чистовых проходов. Однако при этом силы резания небольшие и наклеп поверхности, а, следовательно, связанные с ним напряжения сжатия будут незначительными

В общем случае можно сказать, что величина и знак остаточных напряжений в поверхностном слое прошлифованной детали будут зависеть от взаимодействия четырех групп напряжений:

1. Термическое напряжение, формируемое при термообработке (как указывалось, влияет незначительно).
2. Напряжения, вызываемые фазовоструктурными превращениями в поверхностном слое.
3. Напряжения, образующиеся в поверхностном слое в результате теплового расширения.
4. Напряжения в результате наклепа поверхностного слоя.

Как показывает анализ литературы [1, 2, 4, 5, 6] в поверхностном слое деталей после закалки и низкого отпуска имеются напряжения сжатия величиной  $-40 \cdot 10^7 \dots -20 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ . После шлифовки напряжения сжатия, как правило, заменяются напряжениями растяжения. Наши эксперименты показали примерно такие же результаты с довольно широким разбросом.

Напряжения, связанные с фазово-структурными превращениями в поверхностном слое, рассчитываются по очевидной и многократно проверенной зависимости [2]:

$$\sigma_{\text{фсн}} = \frac{2 \cdot G \cdot E}{4 \cdot G - E} \cdot \left( \frac{P}{P_1} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $G$  – модуль сдвига;  $P$  – плотность структур до шлифования;  $P_1$  – плотность структур после шлифования.

Эта зависимость, учитывая, что при шлифовании происходит перераспределение структур аустенита, мартенсита, отпущенного мартенсита и троостита, может быть преобразована к следующему виду:

$$\sigma_{\text{сmp}} = \frac{2 \cdot G \cdot E}{4 \cdot G - E} \cdot \left( \frac{Z_{0a}^{Pa} \cdot Z_{0m}^{Pm} \cdot Z_{0om}^{Pom} \cdot Z_{0mp}^{Pmp}}{Z_{1a}^{Pa} \cdot Z_{1m}^{Pm} \cdot Z_{1om}^{Pom} \cdot Z_{1mp}^{Pmp}} \right), \quad (2)$$

где  $P_a, P_m, P_{om}, P_{mp}$  – соответственно плотности аустенита, мартенсита, отпущенного мартенсита и троостита;  $Z_{0a}, Z_{0m}, Z_{0om}, Z_{0mp}$  – содержание соответствующих структур в поверхностном слое до шлифования;  $Z_{1a}, Z_{1m}, Z_{1om}, Z_{1mp}$  – содержание соответствующих структур в поверхностном слое после шлифования.

Для точного количественного определения содержания послешлифовочных структур необходимо знать температуру точки  $A_1$  при скоростном нагреве температурой шлифования (назовем ее  $A_{1ск}$ ) и температуру распада мартенсита при отпуске, при которой последний превращается в троостит  $T_{mp}$  (температуру третьего превращения отпуска) и температуры точек  $M_n$  и  $M_k$  (температурный интервал образования мартенсита).

В работе получены следующие теоретико-экспериментальные зависимости:

$$A_{1ck} = A_1 \cdot v_u^{0,1}, \quad (3)$$

где  $A_1$  – температура точки  $A_1$  при стационарном нагреве;  $v_u$  – скорость движения теплового источника м/с.

В настоящей работе получены экспериментально-аналитические выражения, описывающие температуры точек  $M_n$  и  $M_k$ ,

Температура точки  $M_n$

$$T_{mn} = 12,35 \cdot C_m - 16,67 \cdot C_m, \quad (4)$$

где  $C_m$  – содержание углерода в мартенсите.

Влияние легирующих элементов на положение точки  $M_n$  для вольфрама, молибдена, никеля, хрома, марганца определяется по данным работы [3].

Точка  $M_k$  определяется по уравнению

$$T_{mk} = 55 \cdot C_m^{-1,15} - 273. \quad (5)$$

Смещение этой точки под действием легирующих элементов для вольфрама, молибдена, никеля, хрома, марганца, титана определяется по данным работы [3].

Количество аустенита, образованного после шлифования, определяется исходя из следующих соображений. Если температура шлифования поверхностных слоев детали выше температуры аустенитизации (т.е. выше линии PSK на диаграмме состояний железо-углерод [3]), то весь мартенсит слоя, охваченного температурой, большей  $T_{aуст}$ , превращается в аустенит. Процесс этот происходит практически мгновенно, т.к. здесь имеет место только превращение кристаллической решетки ОЦК  $\rightarrow$  ГЦК. Однако, после нагрева происходит процесс быстрого охлаждения, со скоростью значительно выше критической, что должно вызвать образование мартенсита. Однако, если мартенсит поверхностного слоя полностью превращается в аустенит при нагреве, то доля образовавшегося мартенсита из вновь образованного аустенита зависит от того проходит ли температура охлаждения поверхностного слоя весь мартенситный интервал между точками  $M_n$  и  $M_k$ . В подавляющем большинстве случаев этого не происходит, поскольку точка  $M_k$  в большинстве случаев лежит в области отрицательных температур, а температура поверхности может снизиться в условиях цеха лишь до значения  $20^0C$ . В этом случае, для послешлифовочного содержания аустенита будет справедливо соотношение

$$z_{1a} = 1 - \frac{M_n - 20}{M_n - M_k}. \quad (6)$$

Доля образуемого троостита из мартенсита, отпущенного мартенсита и остаточного аустенита при отпуске определялась по полученной нами теоретико-экспериментальной зависимости, приведенной ниже, послойно для каждого рассматриваемого слоя в глубину металла:

$$z_{1mp} = C_m \cdot \exp \left( - \frac{0,09 \cdot v_d^{0,7}}{t^{0,35}} \cdot \left( 0,8 - \frac{T_{нов} - T_{30mn}}{T_{30mn}} \right) \right), \quad (7)$$

где  $v_d$  – скорость движения теплового источника;  $D$  – диаметр шлифовального круга;  $t$  – глубина шлифования;  $T_{нов}$  – температура поверхности;  $T_{3омн}$  – температура третьего превращения отпуска.

Тепловые шлифовочные напряжения возникают от неравномерного теплового расширения поверхностных слоев шлифуемой детали. Следует иметь ввиду то обстоятельство, что при достаточно высоких температурных величинах шлифования – выше  $400^\circ\text{C}$  – металл находится в термопластичном состоянии. Поэтому при неравномерном расширении слоев напряжения достигают значения предела текучести металла при данной температуре, после чего происходит пластическая деформация и релаксация напряжений. При остывании металла происходит сжатие поверхностного слоя и напряжения меняют знак. Однако по закону сохранения энергии они не могут быть больше величины, чем при расширении. Таким образом, чисто тепловые напряжения при шлифовании могут доходить до значений предела текучести металла при данной температуре шлифования. Для определения величины этих напряжений можно использовать зависимость [7, 8]:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot (T + 273) - 2\mu \quad (8)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;  $\alpha$  – линейный коэффициент термического расширения  $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $T$  – температура,  $^\circ\text{C}$ .

Расчеты по этой формуле, как показывают литературные данные и наши исследования, в которых шлифовались образцы, не испытывающие фазово-структурных превращений, дают удовлетворительные результаты.

Следует отметить, что как тепловые напряжения, так и структурные, как правило, обладают положительным знаком, то есть являются напряжениями растяжения, которые чаще всего приводят к трещинам.

Напряжения наклепа являются напряжениями сжатия, то есть отрицательны. Теоретическая величина этих напряжений не рассчитана. Для экспериментального исследования напряжений наклепа необходимо было отделять тепловой фактор от силового, что было возможно при измерении напряжений образцов, шлифованных с определенной температурой шлифования и нагреваемых бегущим источником тепла, который обеспечивает температуру поверхности, равную температуре шлифования. Как показали исследования, если температура шлифования меньше  $400^\circ\text{C}$ , то напряжения наклепа примерно равны величине  $-20 \cdot 10$  Нм. Общее напряжение определялось по формуле

$$G_\Sigma = G_{тем} + G_{стр} + G_{терм} + G_{накл} \quad (9)$$

где  $G_{тем}$  – тепловые напряжения;  $G_{стр}$  – структурные напряжения;  $G_{терм}$  – напряжения термообработки или предшествующей данному проходу термической обработки;  $G_{накл}$  – напряжения наклепа.

Возможность появления трещины оценивалась в слое фазово-структурных превращений или при отсутствии последних в слое толщиной 200 мкм. Слой, в котором оценивалась возможность появления трещины, разбивался одиннадцатью координатами на десять подслоев. Поскольку в каждом подслое был свой фазово-структурный состав после шлифования, то предел прочности этого слоя оценивался, исходя из реального фазового состава по выражению

$$\sigma_{\text{слоя}} = \sigma_a^{Z_a} \cdot \sigma_{\text{март}}^{Z_{\text{март}}} \cdot \sigma_{\text{отп.март}}^{Z_{\text{отп.март}}} \cdot \sigma_{\text{троост}}^{Z_{\text{троост}}}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{\text{слоя}}$  – предел прочности металла в данном подслое;  $\sigma_{\text{троост}}$  – предел прочности троостита;  $\sigma_{\text{ауст}}$  – предел прочности аустенита;  $\sigma_{\text{март}}$  – предел прочности мартенсита;  $\sigma_{\text{отп.март}}$  – предел прочности отпущенного мартенсита [3];  $Z_a$ ,  $Z_{\text{март}}$ ,  $Z_{\text{отп.март}}$ ,  $Z_{\text{троост}}$  – соответствующее содержание в подслоях аустенита, мартенсита, отпущенного мартенсита и троостита.

Гипотеза о существовании трещины принималась в том случае, когда предел прочности металла в данном подслое меньше действующего в данном подслое напряжения. Такая методика оценки позволяла определять глубину трещины, если она начиналась от поверхности и протяженность, если она начиналась под поверхностью.

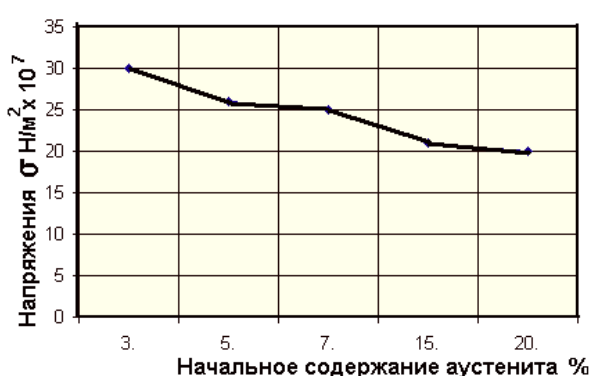


Рис.1. Изменение величины остаточных напряжений от начального содержания аустенита.

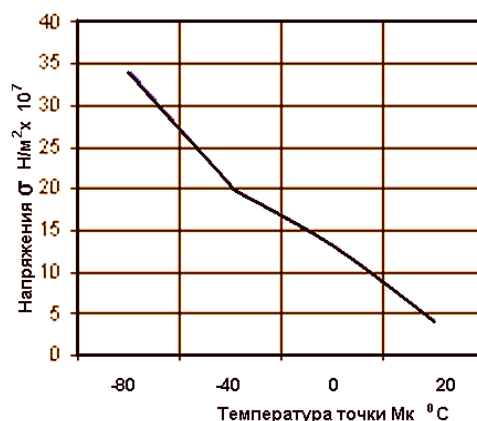


Рис.2. Изменение величины остаточных напряжений от температуры точки Мк.

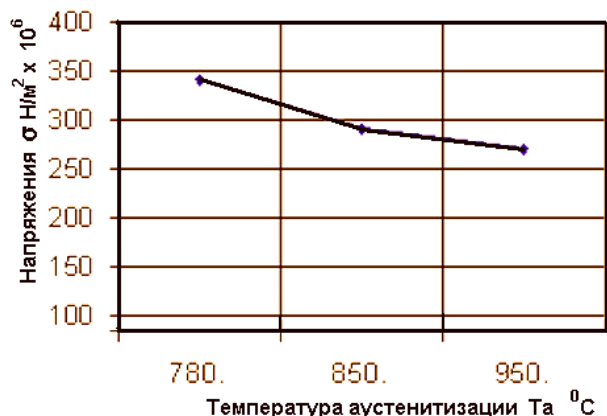


Рис.3. Изменение величины остаточных напряжений от температуры шлифования.

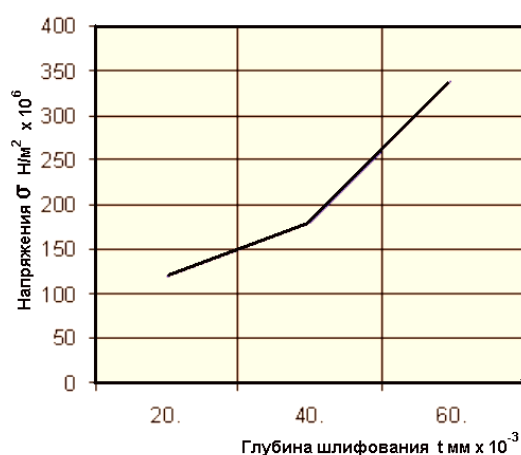


Рис.4. Изменение величины остаточных напряжений от глубины шлифования.

Математическое моделирование по программе *Mathcad* ставило перед собой целью выявить влияние термических и технологических факторов на возможность появления трещин. Расчет производился для случая зубошлифования шестерен из цементированной и закаленной на отпущенный мартенсит стали

20ХГНТР на станке 5831 при базовых данных – содержание аустенита в поверхностном слое равно 3%;  $M_k = -160$ ;  $M_n = -80$ ; начальные напряжения  $\sigma_{нач} = -10 \cdot 10^7$  температура третьего превращения отпуска  $T_{3отп} = 400^\circ\text{C}$ ; температура аустенитизации  $T_A = -780^\circ\text{C}$ ; модуль зуба  $M = 5$ ; число зубьев 35 – 50; скорость штосселя  $V_2 = 5$  м/мин; глубина шлифования  $t = 0,06$  мм; скорость вращения круга  $V_1 = 35$  м/с. Начальное содержание аустенита в поверхностном слое изменялось от 3 до 20%. Результаты расчетов показаны на рис. 1 – рис. 4.

Найденные зависимости показывают, что в случае наличия фазовоструктурных превращений в поверхностном слое детали при шлифовании повышенное дошлифовочное содержание аустенита является полезным, так как приводит к уменьшению шлифовочных напряжений. Так при увеличении дошлифовочного содержания аустенита в поверхностном слое фактически в 7 раз величина напряжений снизилась примерно в 1,6 раза.

Расчеты с учетом влияния расположения интервала мартенситных превращений на температурной шкале показали, что при подъеме мартенситного интервала по шкале температур происходит значительное снижение напряжений. Это снижение происходит до того момента, пока точка  $M_k$  не переместится выше температуры окружающей среды. После чего дальнейшее повышение мартенситного интервала к снижению напряжений уже не приводит.

Начальное напряженное состояние самой своей величиной влияет на результирующую величину напряжений, если температура шлифования была ниже температуры отжига для снятия напряжений.

Показано также, что при повышении температуры аустенитизации от  $780$  до  $950^\circ\text{C}$  величина шлифовочных напряжений несколько уменьшается (примерно на 5 %). При повышении скорости штосселя с 5 до 20 м/мин величина напряжений уменьшается примерно в 1,3 раза. При уменьшении глубины шлифования величина напряжений уменьшается.

#### **Выводы**

1. Если по условиям технологического процесса необходимо шлифование закаленных сталей, то необходимо подбирать такой химический состав этих сталей, чтобы он обеспечивал как можно более высокую температуру точки  $M_k$ .
2. Термическая обработка должна обеспечивать существование в поверхностном слое некоторого количества остаточного аустенита (5-7%).
3. Температура шлифования должна быть (особенно на чистовых проходах) меньше температуры первой фазы рекристаллизации.
4. Скорость детали (подача инструмента) должна иметь значение около 10 м/мин.
5. Величина глубины шлифования не должна быть более 0,03-0,04 мм.

#### **Список литературы**

1. Гриднев В.Н. Механизм и кинетика фазовых превращений при высоких скоростях нагрева // Мартенситные превращения. – К.: Наук. думка, 1978. – С. 107-114.

2. Евсеев Д.Г. Физические основы процесса шлифования / Д.Г. Евсеев, А.Н. Сальников. – Саратов: изд-во Саратовского университета, – 1978. – 125 с.
3. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1984. – 360 с.
4. Лебедев В.Г. Автоматическое управление качеством деталей при шлифовании / В.Г. Лебедев. – К.: Знание, 1981. – 25 с.
5. Аль Аджейлат С.А. Формирование прижогов отпуска при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами из КНБ / С.А. Аль Аджейлат, В.Г. Лебедев // Проблемы техники. Научно-виробничий журнал. – Одеса, 2007, № 4. – С. 128-150.
6. Аль Аджейлат С.А. Энергетические условия образования прижогов закалки при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами из КНБ / С.А. Аль Аджейлат, В.Г. Лебедев // Проблемы техники. Научно-виробничий журнал. – Одеса, 2008, № 1 – С. 130-152.
7. Клименко Н.М. Дослідження процесу обробки деталей з покриттями з плакованого карбїду титана: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування” / Н.М. Клименко. – Одеса, 2005. – 20 с.
8. Чумаченко Т.В. Технологическое обеспечение качества и производительность обработки поверхности шеек валов роторов газовых турбин, напыленных минералокерамикой: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / Т.В. Чумаченко. – Одесса, 2011. – 20 с.

### **Анотація**

#### **Деякі міркування про механізм утворення шліфувальних напруг**

*Розглядаються питання аналітичного й експериментального визначення термодинамічних явищ при шліфуванні загартованих сталей. Розглядаються закономірності формування залишкових напруг і тріщин поверхневого шару деталі, що шліфується.*

### **Abstract**

#### **Some considerations about the mechanism of stress sanding**

*The analytical and experimental determinations of thermodynamic phenomenas in grinding of hardened steels are being discussed. The regularities of formation of residual stresses and cracks in the surface layer of grinded details were observed.*