

## **Влияние обработки импульсным электрическим током на остаточные напряжения, возникающие при шлифовании**

**Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий, И. А. Мамеев**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Экспериментально показано, что пропускание импульсного электрического тока через полосу из нержавеющей стали с поверхностным слоем растягивающих напряжений, возникших при шлифовании, существенно снижает их уровень, при этом эффект обработки не связан с макронагревом металла полосы.*

**Ключевые слова:** шлифование, остаточные напряжения, импульсный электрический ток.

**Введение.** В настоящее время известно, что практически нет материалов, деталей или конструкций, в которых отсутствовали бы остаточные напряжения (ОН). Они возникают вследствие различного рода технологических операций на всех стадиях изготовления конструкций и их элементов. Шлифование – это одна из конечных операций, применяемых при изготовлении деталей машин. Вместе с тем известно, что при шлифовании в тонком поверхностном слое детали возникают ОН значительной величины. В зависимости от условий шлифования (грубое или мягкое), охлаждения, используемого шлифовального круга (вид абразива и связующего, их твердости и пористости) ОН могут быть как растягивающими, так и сжимающими [1].

Остаточные напряжения, возникающие вследствие технологических операций, включая шлифование, всегда являются суперпозициями остаточных макро- и микронапряжений. Только остаточные макронапряжения могут рассматриваться как напряжения, в какой-то степени эквивалентные нагружающим напряжениям от внешних сил и моментов [2]. Несомненно, что влияние ОН особенно выражено в деталях, подвергаемых циклическому нагружению (усталости). Имеются многочисленные публикации, посвященные влиянию ОН при усталости. Например, известны данные по влиянию ОН на коррозионную усталость образцов после различной финишной обработки (шлифование и дробеструйная), которые свидетельствуют о различии между кривыми усталости (кривыми Велера) [3]: живучесть шлифованных образцов из стали SAE 1045 с практически отсутствующими ОН меньше, чем образцов после дробеструйной обработки с поверхностным слоем сжимающих ОН.

Известны также данные [4] о влиянии ОН на характеристики усталости образцов после различных видов шлифования. В этих исследованиях при шлифовании кругом из кубического нитрида бора с дополнительным растяжением формировались поверхностные напряжения сжатия, равные 1200 МПа, при использовании корундового круга без дополнительного растяжения получали растягивающие остаточные напряжения значительной величины. Результаты усталостных испытаний однозначно показывают, что образцы с растяги-

вающими ОН имеют низкую усталостную прочность, в то время как создание в образцах сжимающих ОН существенно повышает их характеристики усталости.

Таким образом, для повышения характеристик прочности деталей машин, эксплуатируемых при циклическом нагружении, необходимо снижать растягивающие ОН, возникающие в результате шлифования. При этом задача разработки новых методов снижения этих напряжений достаточно актуальна.

В качестве альтернативы существующим методам может быть рассмотрена обработка образцов импульсным электрическим током (ПЭТ) высокой плотности. Согласно известным результатам исследований, такая обработка приводит к релаксации напряжений при активном растяжении [5, 6] и остаточных сварочных напряжений [7, 8]. В данной работе приведены результаты исследований по влиянию обработки ПЭТ на остаточные напряжения, возникающие после “грубого” шлифования полос из нержавеющей стали X18H10T.

**Методика экспериментальных исследований.** Для экспериментальных исследований использовали полосы из стали X18H10T шириной 10 мм и толщиной 2 мм. Полосы крепили винтами к жесткой предварительно шлифованной стальной базе, которую, в свою очередь, устанавливали на столе плоскошлифовального станка, обеспечивая совпадение направления шлифования с осью полос. На первом этапе выполняли предварительное шлифование полос до толщины 1,9 мм, при этом использовали смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ) и малую подачу по толщине. На втором этапе подачу СОЖ перекрывали и за два прохода удаляли слой толщиной 0,1 мм при скорости вращения корундового круга 30 м/с. После такого преднамеренно “жесткого” шлифования (с целью получения высокого уровня ОН для последующих исследований) и снятия со стальной базы, полосы имели явно выраженный изгиб – результат действия растягивающих напряжений в слое, прилегающем к шлифованной поверхности.

Полосы разрезали на образцы длиной около 70 мм, затем на шлифованную поверхность образцов в центральной части по стандартной технологии наклеивали тензодатчики с базой 5 мм (рис. 1). Наклейку датчиков и термическую обработку для полимеризации клея выполняли при свободном (изогнутом) состоянии образцов, при этом предполагали, что нагрев и выдержка при термообработке до 180°С не влияют на распределение ОН вследствие их пониженного уровня.

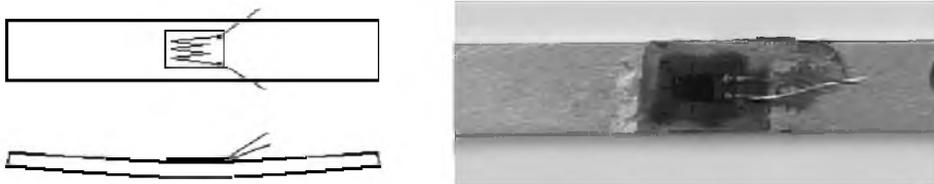


Рис. 1. Внешний вид образца с датчиком, наклеенным на шлифованную поверхность.

При обработке ПЭТ образец прижимали токоподводами генератора импульсных токов [5] к плоской поверхности массивной текстолитовой направляющей так, чтобы между токоподводами был участок образца длиной около

40 мм (обрабатываемая часть) с тензодатчиком в центральной части. Пропускали один импульс тока с амплитудой 50 кА, при этом прирост температуры составлял 110°С.

Сведения об изменении деформации датчиков получали с использованием измерительной системы, которая включала коммерческий модуль измерения деформации ICP CON I-7016P. С помощью дополнительного модуля ICP CON I-7520 (RS 232) полученные результаты передавались в персональный компьютер для дальнейшей обработки. С использованием данной системы регистрировалось начальное сопротивление тензодатчика при свободном (изогнутом) состоянии полосы ( $A_1$ ), при распрямленном состоянии, прижатом к поверхности текстолита ( $A_2$ ), после обработки ИЭТ (пропускание тока и последующее охлаждение) ( $A_3$ ) и при свободном состоянии после обработки ( $A_4$ ).

Из результатов измерений с учетом калибровочного коэффициента  $k$  определялись величина растягивающей деформации, возникшей вследствие выпрямления полосы в исходном (без обработки ИЭТ) состоянии ( $\varepsilon_b = k(A_2 - A_1)$ ) и после обработки ИЭТ ( $\varepsilon_b^{PEC} = k(A_3 - A_4)$ ), а также вызванные обработкой продольное сжатие ( $\Delta\varepsilon = k(A_2 - A_3)$ ) и уменьшение изгибной деформации при свободном состоянии ( $\Delta\varepsilon_b = \varepsilon_b - \varepsilon_b^{PEC}$ ).

**Анализ процесса релаксации напряжений при пропускании ИЭТ.** Рассмотрим процесс формирования и релаксации ОН в полосе металла при ее шлифовании и пропускании ИЭТ. Пластическое сжатие поверхностного слоя  $l$  в результате нагрева при шлифовании после охлаждения формирует в полосе поле ОН (растягивающих в слое  $l$  и сжимающих в слое  $2$ ) – рис. 2,а. Изменение усилия и деформации в слоях описывается диаграммой продольное усилие–деформация, представленной на рис. 2,б. Наличие сил в слоях  $l$  и  $2$  ( $P_{01} = -P_{02}$ ) приводит к возникновению в них растягивающих и сжимающих напряжений. Снижение напряжений в растянутом слое при действии ИЭТ приводит к изменению его неупругой деформации и перераспределению напряжений в полосе. В результате перераспределения напряжений нагрузка понижается до  $P_1 = -P_2$  при равном изменении деформации в слоях.

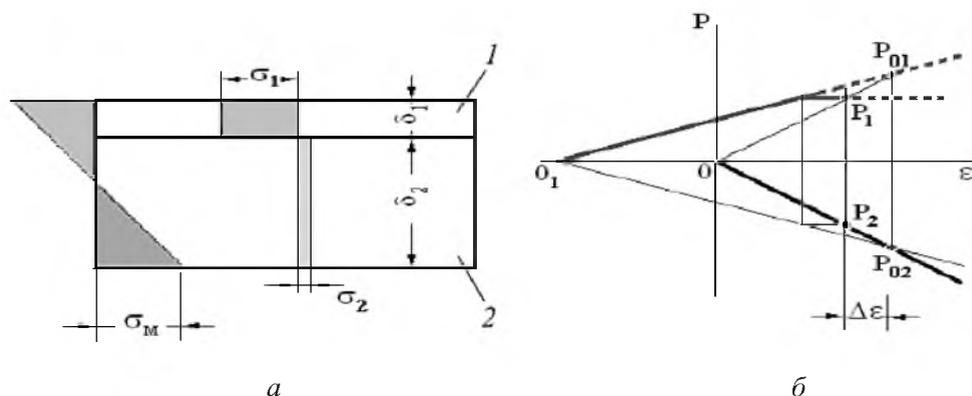


Рис. 2. Схематическое представление распределения напряжений в поперечном сечении полосы (а) и диаграммы продольное усилие–деформация в слоях (б).

Из условий равновесия сил в слоях до ( $P_{01} = P_{02}$ ) и после ( $P_1 = P_2$ ) обработки ИЭТ и совместности деформаций слоев в результате действия ИЭТ ( $\Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon$ ) следует

$$\sigma_{01}\delta_1 = \sigma_{02}\delta_2; \quad (\sigma_{01} - \sigma_1^{PEC})\delta_1 = \sigma_2\delta_2; \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_2 = E\Delta\varepsilon; \quad \Delta\sigma_1 = \sigma_1^{PEC}. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) при заданном отношении толщины слоев изменение напряжения, вызванное действием ИЭТ, связано с величиной продольной деформации сжатия полосы  $\Delta\varepsilon$ :

$$\sigma_1^{PEC} = [(\delta - \delta_1)/\delta_1]E\Delta\varepsilon. \quad (3)$$

Толщина пластически деформированного поверхностного слоя  $\delta_1$  может быть определена по уменьшению деформации шлифованной поверхности полосы при изгибе, полагая, что уровень изгибающего момента сил в поперечном сечении плоской полосы при ее свободном (изогнутом, незакрепленном) состоянии нулевой.

Изменение момента сил в поперечном сечении плоской полосы при ее изгибе  $M = \delta_1\delta\sigma_{01}/2$  вызывает перераспределение ОН, которое определяется разницей напряжений в закрепленной полосе и напряжений разгрузки при снижении изгибающего момента, т.е. разницей эпюр начальных напряжений в прямой полосе и эпюры упругого изгиба. На шлифованной поверхности изменение напряжений при изгибе будет  $\sigma_b = 6M/\delta^2 = 3(\delta_1/\delta)\sigma_{01}$ . Следовательно, уровень напряжений  $\sigma_{01} - 3(\delta_1/\delta)\sigma_{01} = [1 - 3(\delta_1/\delta)]\sigma_{01}$  и деформации на поверхности при изгибе пропорционален исходному напряжению. Изменение деформации, вызванное ИЭТ, составляет  $\Delta\varepsilon_b = [1 - 3(\delta_1/\delta)]\sigma_1^{PEC}/E$ . Следовательно,

$$\sigma_1^{PEC} = \frac{\delta}{\delta - 3\delta_1} \Delta\varepsilon_b E. \quad (4)$$

Толщина деформированного слоя  $\delta_1$  определяется из условия равенства значения  $\sigma_1^{PEC}$  по уравнениям (3) и (4):

$$\frac{\delta}{\delta - 3\delta_1} \Delta\varepsilon_b = [(\delta - \delta_1)/\delta_1]\Delta\varepsilon,$$

откуда получим

$$\delta_1 = \frac{\delta}{6} [\xi + 4 - (\xi^2 + 8\xi + 4)^{1/2}],$$

где

$$\xi = \Delta\varepsilon_b / \Delta\varepsilon. \quad (5)$$

С помощью полученных в эксперименте значений снижения изгибной и продольной деформации  $\xi = \Delta \varepsilon_b / \Delta \varepsilon = 0,19/0,33$  при толщине полосы  $\delta = 1,8$  мм по уравнению (3) можно определить толщину деформированного слоя  $\delta_1 = 0,476$  мм, при этом снижение ОН в результате пропускания тока через образец, определенное по уравнению (3) или (4), составляет  $\sigma_1^{PEC} \approx 39$  МПа.

**Оценка нетеплового действия тока на релаксацию напряжений.** Полученные выше данные используются для оценки “специфического”, т.е. нетеплового [5, 6], действия тока на релаксацию ОН. Принимаем, что предел текучести  $\sigma_Y$  исследованной стали при нулевой температуре составляет 250 МПа.

Тепловое действие тока при линейном снижении предела текучести с  $\sigma_Y = 250$  МПа до  $\sigma_Y^{1000} = 25$  МПа при повышении температуры на  $1000^\circ\text{C}$  (принимается линейный характер влияния температуры на предел текучести) можно характеризовать коэффициентом  $k_T = (\sigma_Y - \sigma_Y^{1000}) / \Delta T = 0,225$  МПа/°C. Аналогичный коэффициент при пропускании ПЭТ через полосу при ее закреплении (без изгиба) с учетом повышения температуры и снижения напряжения в слое I (рис. 3) (по линии  $\sigma_{01} - 2$ ) составляет  $k_T^{PEC} = \sigma^{PEC} / \Delta T^{PEC} = 39/110 = 0,3545$  МПа/°C.

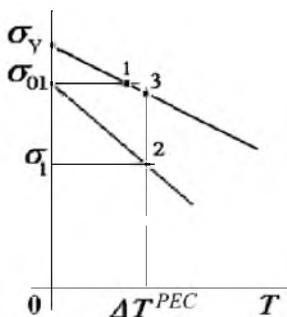


Рис. 3. Схема изменения напряжения в деформированном слое при повышении температуры вследствие ИЭТ.

Из сравнения коэффициентов  $k_T^{PEC}$  и  $k_T$  следует, что снижение напряжения вследствие пропускания ИЭТ происходит более интенсивно. Причем при действии ИЭТ напряжение снижается с максимального уровня  $\sigma_{01}$  после нагрева и остывания в процессе шлифования до  $\sigma_1$  в точке 2 (рис. 3), оставаясь ниже предела текучести металла при соответствующей температуре. Величина напряжения  $\sigma_{01}$  определяется пределом текучести поверхностного слоя в момент, соответствующий переходу деформирования от упругопластического к упругому в процессе остывания после шлифования. Различие в температуре слоев  $\Delta T$  обеспечивает разное тепловое их расширение и приводит к напряжению  $\alpha E \Delta T$ , равному пределу текучести при соответствующей температуре  $\sigma_Y - k_T \Delta T$ . Из равенства этих величин, т.е.  $\sigma_Y - k_T \Delta T = \alpha E \Delta T$ , следует

$$\sigma_{01} = \sigma_Y - k_T \Delta T = \sigma_Y \alpha E / (k_T + \alpha E). \tag{6}$$

Таким образом, в результате теплового действия ИЭТ (повышение температуры на 110°C) предел текучести снижается до  $\sigma_Y(T) = \sigma_Y - k_T \Delta T^{PEC} = 224,75$  МПа (на рис. 3 точка 3).

После нагрева и охлаждения поверхностного слоя при шлифовании напряжения в нем ( $\sigma_{01} = 230$  МПа) по данным численного моделирования, которые совпадают с расчетом по формуле (6), ниже предела текучести. Следовательно, собственно, тепловое действие тока может уменьшить напряжения на величину  $\sigma_{01} - \sigma_Y(T) = 5,25$  МПа, в то время как снижение напряжения  $\Delta\sigma^{PEC} = 39$  МПа, полученное экспериментально, почти в 7,5 раза выше. Указанное повышенное снижение напряжения в поверхностном слое может быть результатом специфического (нетеплового) действия тока.

## Выводы

1. Пропускание импульсного тока через полосу из стали X18H10T с поверхностным слоем растягивающих напряжений, возникших вследствие шлифования, снижает уровень растягивающих напряжений.

2. Снижение остаточных напряжений в результате обработки током не связано с макронагревом металла полосы.

## Резюме

Експериментально показано, що пропускання імпульсного електричного струму через смугу з нержавіючої сталі з поверхневим шаром розтяжних напружень, зумовлених шліфуванням, суттєво знижує рівень цих напружень, при цьому ефект обробки не пов'язаний з макронагріванням металу смуги.

1. *Grum J.* Analysis of residual stresses in main crankshaft bearings after induction surface hardening and finish grinding // Proc. Inst. Mech. Eng. – Pt. D: J. Automobile Eng. – 2003. – **217**, No. 3. – P. 173 – 182.
2. *Scholtes B.* Residual stress analysis – a useful tool to assess the fatigue behavior of structural components // Advances in X-ray Analysis. – 2000. – **43**. – P. 39 – 47.
3. *Herzog R.* Auswirkungen bearbeitungsbedingter Randschichteigenschaften auf das Schwingungsrißkorrosionsverhalten von CK45 und X35CrMo17. – Aachen: Shaker Verlag, 1998.
4. *Sollich A.* Verbesserung des Dauerschwingverhaltens hochfester Stähle durch gezielte Eigenspannungserzeugung, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 5, No. 376, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.
5. *Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А.* Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности // Пробл. прочности. – 2004. – № 4. – С. 60 – 67.

6. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А., Олисов А. Н. Анализ процесса релаксации растягивающих напряжений под действием импульса электрического тока // Там же. – 2006. – № 1. – С. 116 – 127.
7. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А. Вплив імпульсного електричного струму на релаксацію залишкових зварювальних напружень // Вісн. Терн. держ. техн. ун-ту. – 2007. – № 3. – С. 16 – 22.
8. Лобанов Л. М., Півторак В. А. та ін. Нові методи оцінки технічного стану зварних з'єднань, визначення і регулювання залишкових напружень // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2006. – С. 368 – 373.

Поступила 05. 03. 2008