

УДК 621.9

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ НА СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

**Э. И. ДМИТРИЧЕНКО, Е. Э. ДМИТРИЧЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** магнитное поле, поверхностный слой, фазовый состав, структура, эксплуатационные свойства.

### **Введение**

Магнитно-электрическое шлифование (МЭШ) представляет собой способ комбинированной электрофизической обработки, при котором производится совмещение микрорезания абразивными зёрнами с электроэрозионным воздействием на обрабатываемую поверхность магнитного поля [1].

В основу теоретической предпосылки для описания явлений, протекающих при введении технологического тока и магнитного поля в зону обработки токопроводящего абразивного круга с поверхностью детали, положена контактная форма электрической эрозии, когда в результате концентрированного тепловыделения разрушается место стягивания токовых линий при достижении плотности сквозного тока выше некоторого значения и воздействия на расплав и канал разряда магнитодвижущей силы [2].

Поверхностный слой деталей оказывает влияние на следующие эксплуатационные свойства: прочность (статическую, циклическую, ударную), трение и износ, сопротивление коррозии, эрозии, кавитации, герметичность соединений, точность деталей и надёжность неподвижных посадок и др. Шероховатость и волнистость поверхности, структура, фазовый и химический состав поверхностного слоя по разному влияют на эксплуатационные свойства деталей.

Формирование поверхностного слоя детали определяется условиями ее обработки (последовательность и режимы обработки, состояние оборудования и т. д.). При этом изменения в свойствах поверхностного слоя в результате той или иной операции не исчезают полностью в ходе последующей обработки, а в определенной степени сохраняются, формируя эксплуатационные свойства деталей [3], [4]. Поверхностный слой в общем случае состоит из нескольких подслоев, в том числе текстурированного, в котором наблюдаются изменения кристаллической структуры. Толщина этого слоя невелика, поэтому происшедшие изменения могут быть оценены, в частности, с помощью методов рентгеноструктурного анализа. Закономерности технологического наследования свойств достаточно полно изучены применительно к типовым конструкционным материалам [5], но подробно не рассмотрены применительно к обработке нержавеющей стали и жаропрочных сплавов, хотя состояние поверхностного слоя деталей из этих материалов в значительной степени определяет такие их свойства, как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость.

Цель работы – установить влияние условий финишной магнитно-электрической обработки деталей из жаропрочного сплава ХН77ТЮР и аустенитной стали 12Х18Н10Т на состояние их поверхностных слоев.

**Материалы и методика исследований**

Оценивались закономерности влияния методов обработки на изменения свойств поверхностного слоя образцов из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т и жаропрочного сплава ХН77ТЮР, химический состав по ГОСТ 5632–2014 и основные свойства которых приведены в табл. 1 и 2.

Исследования состояния поверхностного слоя деталей из нержавеющей стали и жаропрочного сплава выполняли на установке рентгеноструктурного исследования «ДРОН-3» в медном излучении. Анализировались микро- и макронапряжения, а также исследовалась текстура поверхностного слоя.

Таблица 1

**Химический состав и свойства нержавеющей стали 12Х18Н10Т**

Химический состав, %								σ <sub>в</sub> , МПа	E, ГПа
С	Cr	Ni	Mn	Si	S	Ti	P		
0,12	17–19	9–11	2,0	0,8	0,02	0,8	0,04	520	18,4 · 10 <sup>4</sup>

Таблица 2

**Химический состав и свойства жаропрочного сплава ХН77ТЮР**

Химический состав, %								σ <sub>в</sub> , МПа	E, ГПа
С	Cr	Ni	Mn	Si	Al	Ti	P		
0,07	19–22	осн.	0,4	0,6	0,6–1	2,2–2,8	0,015	500	21,0 · 10 <sup>4</sup>

Известно, что деформации поверхностного слоя в направлении, перпендикулярном обработанной поверхности, можно рассчитать по методике академика Н. Н. Давиденкова [5]:

$$\varepsilon = \mu / E(\sigma_1 + \sigma_2),$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; σ<sub>1</sub>, σ<sub>2</sub> – главные напряжения.

Как известно, рентгеновский метод исследования остаточных напряжений I рода (макронапряжений) основан на том, что для всех атомных плоскостей поликристалла, одинаково сориентированных по отношению к действующим силам, при нагружении одинаково изменяются межплоскостные расстояния d, т. е. для них относительные деформации ε = Δd / d = const. Значение Δd / d можно рассчитать, используя уравнение Вульфа–Брэгга:

$$n\lambda = 2d \sin \Theta,$$

где n – порядок дифракционного максимума; λ – длина волны; Θ – угол скольжения. Принимаем

$$\Delta d / d = \text{ctg} \Theta_3 (\Theta_3 - \Theta),$$

где Θ<sub>3</sub>, Θ – углы отражения рентгеновского излучения соответственно от эталона и исследуемого образца.

Тогда макронапряжения:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = (E/\mu) \operatorname{ctg} \Theta_3 (\Theta_3 - \Theta).$$

Строение металла, в том числе поверхностного слоя, характеризуется его тонкой кристаллической структурой. Основные параметры тонкой структуры – это блоки мозаики, возникающие в результате раздробления зерен на фрагменты и далее на блоки, напряжения II и III рода (микро- и субмикронапряжения) и плотность дислокаций. От тонкой структуры зависит поведение металла в процессе эксплуатации детали.

Используя известный метод аппроксимации [6], можно найти физическое уширение двух последовательных рентгеновских линий в результате дробления зерен и изменения уровня напряжений II рода. При этом уширение первой линии характеризует преимущественно изменения в размерах блоков мозаики, а второй – изменение микронапряжений. Величины блоков мозаики  $D$  и деформаций  $\Delta d / d$  оказывают различное влияние на свойства металла. Упрочнение при фазовом наклепе и пластической деформации следует связывать в первую очередь с дроблением мозаичных блоков, изменением степени их разобщенности, углов взаимного поворота и т. д. Это объясняется механизмом пластической деформации металлов.

Максимальное касательное напряжение (микронапряжения) на поверхности образца от зерна абразива, найденное из решения задачи Буссинеска, равно

$$\tau_{\max} = P(1 - 2\nu) / 2\pi R^2,$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $R = \sqrt{r^2 + z^2}$ ,  $r, z$  – координаты точки;  $P$  – давление зерна абразива.

Движение дислокаций начинается при напряжении, превышающем напряжение Пайерлса  $\tau_p$ . Поэтому радиус  $\rho$  области, в которой будет наблюдаться движение дислокаций, найдется из условия

$$\rho = \sqrt{P_1(1 - 2\nu) / 2\pi\tau_p},$$

где  $P_1 = P/n_a$  – давление одного зерна абразива;  $n_a$  – количество зерен абразива.

Скольжение по кристаллографическим плоскостям происходит не путем одновременного смещения отдельных атомных плоскостей, а в результате однотипных перемещений групп атомов, распространяющихся по кристаллической решетке по определенным направлениям. Такой последовательный процесс перемещения может распространяться в определенных направлениях на большие расстояния, пока на его пути сохраняется правильная периодичность кристаллической решетки. Процесс прекращается, как только перемещения встречают нарушения правильного строения решетки, например, границу блока. Напряжения II рода играют в упрочнении металлов вспомогательную роль. Они не связаны с сопротивлением деформации, а характеризуют свойства поликристаллов данного материала. Такая взаимосвязь между размерами блоков и микронапряжениями объяснена на основе представления деформации блока в виде изгиба атомных плоскостей [7]. Если силы связи между атомами достаточно велики, чтобы допускать изгиб блока, он может существовать в зерне металла. Если силы связи недостаточны, происходит разрушение блока, и каждый из образующихся новых блоков имеет меньший размер и меньшую деформацию.

Зная физическое уширение линий, можно определить также плотность дислокаций в слое, используя уравнения [5]:

$$\rho = k\beta^2 / Fb^2,$$

где  $k$  – постоянная, зависящая от коэффициента Пуассона и модуля упругости, формы рентгеновских линий и других параметров;  $\beta$  – физическое уширение первой линии;  $F$  – коэффициент, зависящий от изменения упругой энергии одиночной дислокации при ее взаимодействии с полем напряжений в кристаллите;  $b$  – вектор Бюргерса.

**Результаты исследований и их обсуждение**

Изменения свойств поверхностного слоя исследовались после выполнения следующих технологических операций:

– для аустенитной стали: 1 – фрезерование (станок модели 6Р12;  $V = 76$  м/мин;  $S_M = 250$  мм/мин;  $t = 1,2$  мм); 2 – контактно-эрозионное шлифование ( $I = 21$  А;  $V = 17,4$  м/с;  $S_M = 10$  мм/с;  $t = 0,1$  мм); 3 – МЭШ ( $I = 21$  А;  $B = 0,24$  Тл;  $V = 18$  м/с;  $t = 0,1$  мм;  $S_M = 26$  мм/с);

– для жаропрочного сплава: 1 – фрезерование ( $V = 82$  м/мин;  $S_M = 200$  мм/мин;  $t = 1,2$  мм); 2 – фрезерование + контактно-эрозионное шлифование ( $I = 18$  А;  $V = 19,5$  м/с;  $t = 0,1$  мм;  $S_M = 10$  мм/с); 3 – фрезерование + контактно-эрозионное шлифование + полирование ( $V = 32$  м/с;  $S_M = 26$  мм/с); 4 – фрезерование + контактно-эрозионное шлифование + МЭШ ( $I = 24$  А;  $B = 22$  Тл;  $V = 18$  м/с;  $t = 0,1$  мм;  $S_M = 10$  мм/с).

Результаты исследований поверхностных слоев деталей из аустенитной стали приведены на рис. 1. Анализируя влияние условий обработки на состояние поверхностного слоя, легко заметить, что при фрезеровании в поверхностном слое наблюдаются значительные растягивающие напряжения, вызванные высокими температурами в зоне фрезерования. Роль процесса шлифования – обеспечивать формирование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений I рода [7].

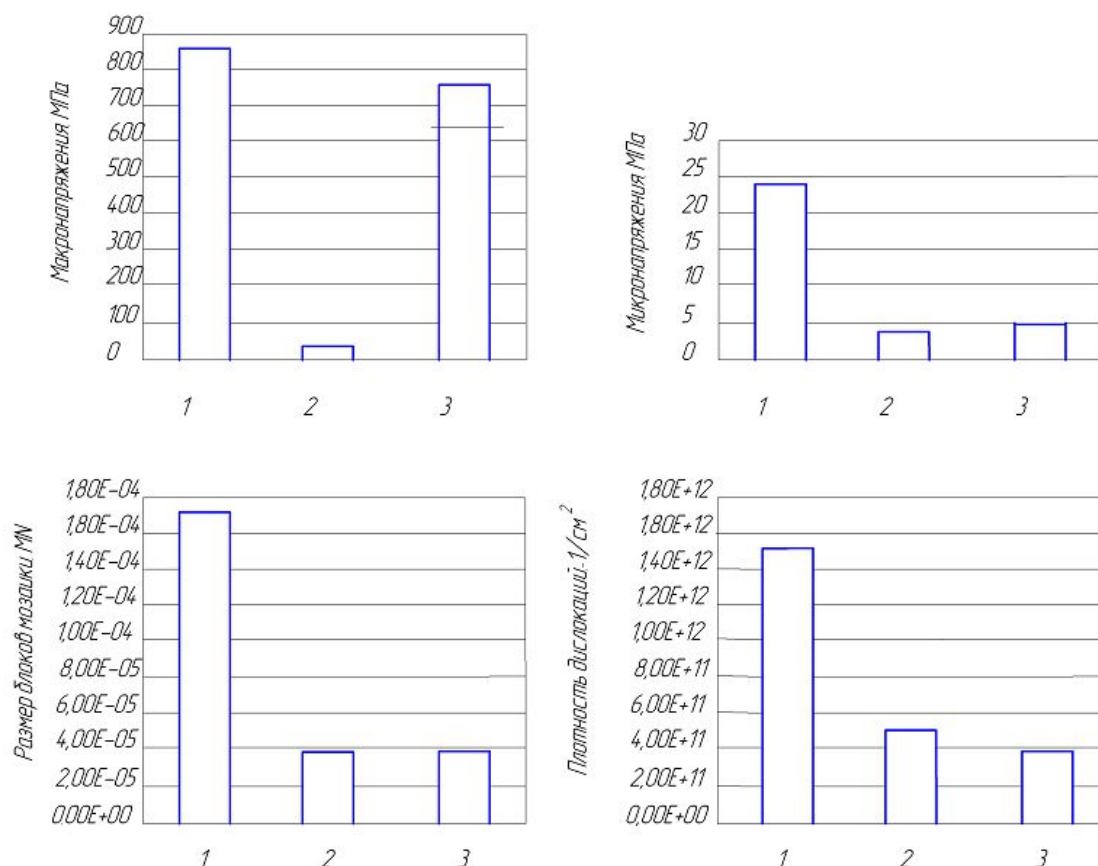


Рис. 1. Параметры поверхностного слоя при обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т (1–3 – технологические операции)

Одним из важных явлений, протекающих в зоне резания при шлифовании, следует считать [7] адсорбционно-пластифицирующий эффект (АПЭ), под которым принято понимать комплекс явлений, протекающих на микроуровне на поверхности раздела «твердое тело – среда» при деформировании и разрушении металлов в условиях воздействия адсорбционных сред и приводящих к изменению характера и энергосиловых параметров деформирования материала на макроуровне. Одним из методов обеспечения критериальных требований для проявления АПЭ является магнитно-электрическое шлифование (МЭШ), которое особенно эффективно для снятия больших припусков при обработке деталей из нержавеющей и жаропрочных сплавов на хромоникелевой основе, титановых сплавов, магнитных сплавов.

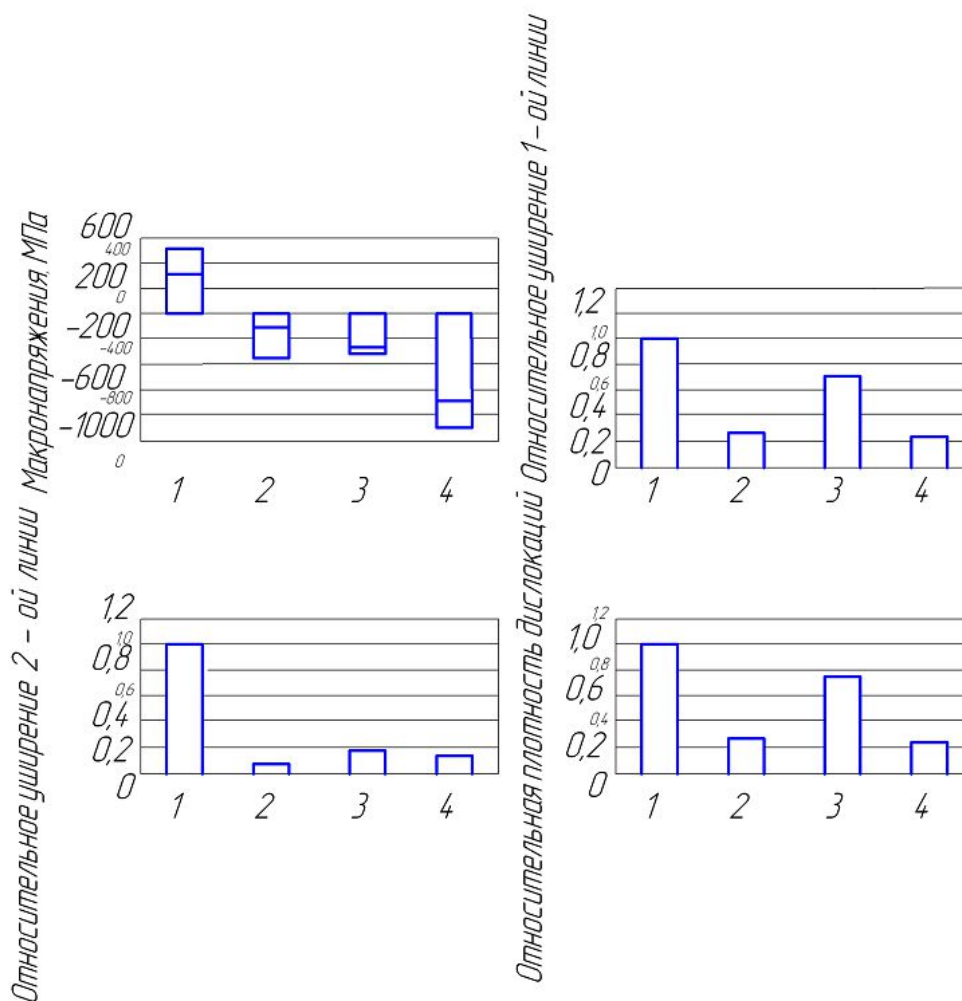


Рис. 2. Параметры поверхностного слоя при обработке жаропрочного сплава ХН77ТЮР (1-4 – технологические операции)

В случае полирования поверхности непосредственно после фрезерования макронапряжения минимальны, полирование после шлифования несколько снижает уровень макронапряжений. Параметры тонкой структуры приобретают наиболее благоприятное сочетание после полирования поверхности.

Результаты расчетов напряжений I рода, соотношений между физическими уширениями 1-й и 2-й рентгеновских линий и относительной плотностью дислокаций в поверхностном слое детали из жаропрочного сплава приведены на рис. 2. Установлено значительное влияние технологии обработки на состояние поверхностного слоя

детали из жаропрочного сплава. В зависимости от способа обработки значительно изменяются напряжения I рода, относительная плотность дислокаций (за 1,0 принята плотность после фрезерования) и другие параметры тонкой структуры.

Как и в случае обработки аустенитной стали, МЭШ улучшает состояние поверхностного слоя, а именно, исчезают растягивающие напряжения, снижается плотность дислокаций.

### **Заключение**

Таким образом, применение в качестве финишной обработки магнитно-электрического шлифования позволит обеспечить улучшение свойств поверхностного слоя при обработке деталей из аустенитных сталей и жаропрочных сплавов.

### **Литература**

1. Повышение износостойкости деталей машин комплексным магнитно-электрическим способом / П. В. Сысоев [и др.] // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, № 5. – С. 938–943.
2. Шулев, Г. С. Повышение микротвердости аустенитных сталей магнитно-электрическим шлифованием / Г. С. Шулев, Э. И. Дмитриченко // Проблемы обработки поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии : тез. докл. науч.-техн. конф. – Минск, 1988. – С. 88.
3. Дмитриченко, Э. И. К вопросу о механизме разрушения обрабатываемой поверхности при магнитно-электрическом шлифовании / Э. И. Дмитриченко, М. П. Кульгейко, Е. Э. Дмитриченко // Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике : тр. 10-й науч.-техн. конф. профессор.-преподават. состава, аспирантов и студентов ; под ред. М. В. Голуба : в 2 ч. – Брест : БПИ, 1998. – Ч. 1. – С. 54–57.
4. Dmitrichenko, E. I. Прогрессивен метод за повишаване микро твърдостта на повърхнини чрез магнитно-електрическо шлифоване // ПРОГРЕСИВНИ МАШИНОСТРОИТЕЛНИ:ТЕХНОЛОГИИ, Русе, България, 1993. – 128–131 с.
5. Давиденков, Н. Н. Об измерении остаточных напряжений / Н. Н. Давиденков // Завод. лаб. – 1970. – Т. XVI, № 2. – С. 182–192.
6. Постнов, В. В. Интенсификация нестационарного резания труднообрабатываемых материалов на основе оптимизации термодинамических условий изнашивания режущего инструмента / В. В. Постнов // Вестн. УГАТУ. – 2006. – Т. 7, № 2 (15). – С. 92–98.
7. Сурду, М. В. Підвищення ефективності шліфування важкооброблюваних матеріалів за рахунок удосконалення кінематики процесів : автореф. дис. канд. тех. наук 14.01.06 / Сурду Микола Васильович; НТУ ХПІ. – Х., 2006. – 22 с.

*Получено 25.04.2018 г.*