

УДК 621.73.06-52

**Коваленко О. А.
Боровик П. В.****ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ**

Одним из распространенных способов повышения стойкости разделительных штампов является электроискровое легирование рабочих поверхностей различными твердыми сплавами и тугоплавкими металлами.

При разработке технологий упрочнения рабочих поверхностей разделительного штампового инструмента и оценке качества упрочненного слоя существенное внимание уделяется вопросам формирования микроструктуры слоя, механическим характеристикам поверхности, напряжениям, возникающим в материале инструмента и шероховатости.

В конечном итоге полученная микроструктура упрочненного слоя, его твердость и их распределение по глубине влияют на формирование напряжений, возникающих в материале инструмента при выполнении разделительных операций.

В работах [1, 2] выполнена оценка и сравнение методом конечных элементов величины напряжений, возникающих в штампуемом материале, а так же на поверхности режущих кромок инструмента, изготовленного из стали У8А после термической обработки, а так же с последующим нанесением упрочняющего покрытия ванадием электроискровым легированием.

Результаты, приведенные в данных работах, показывают, что при упрочнении поверхностного слоя инструментов электроискровым легированием, в процессе штамповки изменяется напряженное состояние их поверхностного слоя. Однако, для проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, с целью оценки распределения напряжений по всему упрочненному слою и оценки влияния ЭИЛ на износостойкость инструментов с разной шероховатостью обработанной поверхности, существующей информации о механических свойствах материала в упрочненном слое недостаточно. Это указывает на необходимость проведения дополнительных исследований, что позволит расширить представление о напряженно-деформированном состоянии инструмента, усовершенствовать форму рабочей поверхности и оптимизировать процесс по энергосиловым параметрам.

Результаты работ [3–8] показывают, что существует достаточное количество способов определения механических свойств материала по микротвердости. Таким образом, представляется целесообразным проведение экспериментальных исследований по распределению микротвердости по толщине упрочненного слоя с последующим определением механических свойств, которые могут быть использованы при расчете напряженно-деформированного состояния рабочего инструмента после упрочнения.

Целью данной работы является получение зависимости распределения механических свойств по глубине упрочненного слоя поверхностей с различной шероховатостью для дальнейшей оценки напряженно-деформированного состояния рабочего инструмента.

Известно, что твердость напрямую зависит от химического состава и микроструктуры. При нанесении на поверхность инструментальной стали (У8А) ванадия методом электроискрового легирования в поверхностных слоях образуется структура, состав которой приведен в табл. 1 [9].

Таким образом, на поверхности слоя основной составляющей являются нитриды и карбиды ванадия и железа, имеющие высокую твердость – до 3000 HV [10, 11]. По мере удаления вглубь металла количество нитридов и карбидов уменьшается и основной составляющей становится раствор ванадия в α -Fe. Как следствие снижается и твердость.

Кроме твердости качество слоя оценивается и шероховатостью упрочненной поверхности. В литературе имеется достаточно информации о шероховатости слоев после упрочнения [12, 13] и недостаточно информации о выборе исходной шероховатости поверхности.

Таблица 1

Фазовый состав поверхностных слоев стали после ЭИЛ [9]

Глубина шлифования, мкм	Фазовый состав
поверх.	VN, Fe ₄ N, Fe ₃ V ₃ C, VC, α(Fe-V), Аост
5 ± 1	VN, α(Fe-V), Аост
11 ± 1	VN, α(Fe-V), Аост
17 ± 1	α(Fe-V)

В ходе настоящего исследования использовали упрочненные образцы из стали У8А с различной исходной (до нанесения покрытия) шероховатостью [14]. В результате было установлено, что от величины исходной шероховатости поверхности зависит не только конечная шероховатость поверхности, но и значения микротвердости на поверхности, а также качество и глубина упрочненного слоя (табл. 2).

Таблица 2

Глубина упрочненного слоя и значения микротвердости для образцов с разной шероховатостью поверхности

Номер образца	Шероховатость поверхности, мкм	Глубина «белого» слоя, мм	Глубина слоя с высокой микротвердостью, мм	Глубина упрочненного слоя, мм	Микротвердость на поверхности, Нц
11	5,1	0,012	0,034	0,09	1918
6	6,0	0,0072	0,011	0,05	2110
12	5,75	0,008	0,012	0,045	2320
5	5,7	0,0095	0,011	0,04	1760
7	4,6	0,0062	0,015	0,077	3019
4	5,2	0,0096	0,01	0,04	2320
10	4,7	0,010	0,016	0,065	2568
3	7,05	0,0081	0,015	0,05	2320
2	6,45	0,0145	0,034	0,08	1610

Результаты измерения микротвердости по толщине упрочненного слоя приведены на рис. 1.

В дальнейшем под глубиной слоя следует понимать не только величину «белого» нетравящегося слоя, но и зону с повышенной твердостью. Это объясняется тем, что нетравящийся слой с большим количеством карбидов и нитридов и высокой твердостью, переходит в зону термического влияния, состоящую из мелкозернистой закалочной структуры с повышенной твердостью.

Кроме полученных ранее экспериментальных данных [9, 14] по микроструктуре слоя, его глубине и микротвердости, для определения напряжений, возникающих в поверхностных слоях рабочих поверхностей инструмента, необходима информация о прочностных характеристиках материала (модуле нормальной упругости) как на поверхности (в «белом» нетравящемся слое), так и в более глубоких слоях, относящихся к зоне термического влияния.

Как указывалось ранее, в настоящее время существует достаточное количество способов определения модуля нормальной упругости (модуля Юнга) по микротвердости слоя [3–8].

В основу определения модуля Юнга была положена методика, предложенная в работе [3], согласно которой:

$$E = \sigma_{теор} \cdot 4\pi(1 - \nu^2), \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона;

$\sigma_{теор}$ – теоретическая прочность кристалла.

В основном коэффициент Пуассона находится в пределах 0,2–0,4, а для твердых покрытий типа карбидов, нитридов и т. д. коэффициент Пуассона принимается равным 0,2 [8, 15].

Теоретическая прочность кристалла от реальной отличается тем, что под ней подразумевают прочность, например, кристалла без внутренних дефектов [16]. Если принять, что величина теоретической прочности кристалла эквивалентна теоретическому пределу прочности материала, то вместо $\sigma_{теор}$ можно использовать величину $\sigma_{в теор}$.



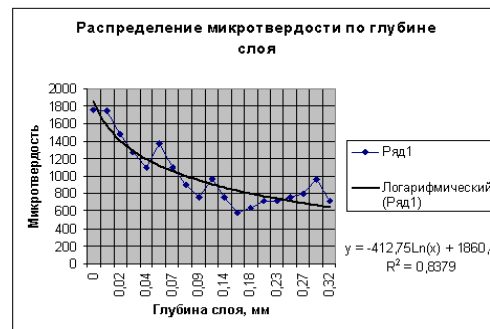
образец 2



образец 3



образец 4



образец 5



образец 6



образец 7



образец 10



образец 11



образец 12

Рис. 1. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя для образцов с различной шероховатостью поверхности

Реальная прочность материала примерно на порядок меньше теоретической [16], тогда:

$$\sigma_{теор} \approx \sigma_{\sigma_{теор}} \approx 10 \sigma_{\sigma} . \quad (2)$$

В результате зависимость (1) примет вид:

$$E = 10 \sigma_{\sigma} \cdot 4 \pi (1 - 0,2^2) . \quad (3)$$

Для определения величины предела прочности σ_{σ} допустимо использовать соотношение между твердостью по Бринеллю HB и пределом прочности [17]:

$$\sigma_{\sigma} = 3,5 HB . \quad (4)$$

Величину HB в свою очередь можно определить, пользуясь переводной таблицей значений твердости, имея значения микротвердости [18].

Значения модуля нормальной упругости для образцов с разной шероховатостью поверхности, полученные по экспериментальным данным в результате вычислений по формулам (3)–(4), представлены в табл. 3.

Таблица 3

Глубина упрочненного слоя и значения модуля упругости для образцов с разной шероховатостью поверхности

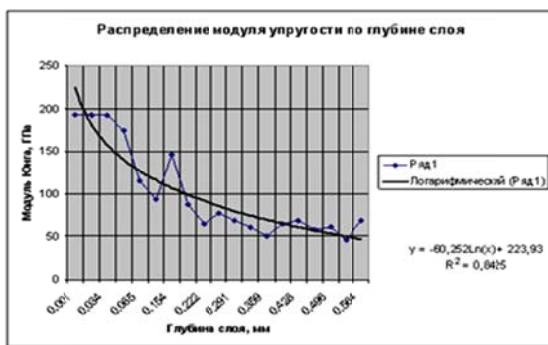
Номер образца	Шероховатость поверхности, мкм	Глубина «белого» слоя, мм	Глубина слоя с высоким модулем Юнга, мм	Глубина упрочненного слоя, мм	Модуль Юнга на поверхности, ГПа
11	5,1	0,012	0,034	0,09	281
6	6,0	0,0072	0,011	0,05	301
12	5,75	0,008	0,012	0,045	315
5	5,7	0,0095	0,011	0,04	281
7	4,6	0,0062	0,015	0,077	411
4	5,2	0,0096	0,01	0,04	316
10	4,7	0,010	0,016	0,065	349
3	7,05	0,0081	0,015	0,05	316
2	6,45	0,0145	0,034	0,08	258

При сравнении результатов, приведенных в табл. 2 и табл. 1 видно, что при изменении шероховатости упрочненного слоя изменяется и твердость его поверхности.

По мере продвижения вглубь металла по результатам расчетов модуль нормальной упругости изменяется, на определенной глубине принимая значения, соответствующие модулю Юнга закаленной стали У8А (200–210 ГПа). Графически распределение модуля нормальной упругости по глубине слоя представлено на рис. 2.

При анализе зависимостей обращает на себя внимание тот факт, что на определенной глубине слоя значения модуля упругости оказываются заниженным (ниже модуля упругости обыкновенной стали ≈ 200 –210 ГПа). По всей вероятности это связано с тем, что способ расчета модуля Юнга, который взят нами за основу [3], предлагался авторами для определения характеристик поверхностных упрочненных слоев, а для обыкновенной стали он является не вполне корректным. В конечном итоге ту глубину слоя, на которой значения модуля упругости соответствуют реальным и можно считать глубиной упрочненного слоя. Тем более что это соответствует величине слоя с повышенной твердостью, приведенной в табл. 2.

Таким образом, для оценки напряженно-деформированного состояния, возникающего в поверхностных упрочненных слоях инструмента, в результате обработки экспериментальных данных по распределению твердости получены данные по распределению прочностных характеристик в металле. И следующим этапом работы будет являться определение напряженно-деформированного состояния рабочих поверхностей матрицы и пуансона при выполнении разделительных операций листовой штамповки методом конечно-элементного моделирования с применением программного комплекса ABAQUS.



образец 2



образец 3



образец 4



образец 5



образец 6



образец 7



образец 10



образец 11



образец 12

Рис. 2. Распределение модуля упругости по глубине слоя

ВЫВОДЫ

В результате обработки экспериментальных данных по распределению твердости получены зависимости прочностных характеристик в упрочненном слое рабочего инструмента.

Установлено, что для образцов с различной шероховатостью упрочненной поверхности зависимость механических характеристик (микротвердость и модуль нормальной упругости) по толщине упрочненного слоя различна.

Результаты могут быть использованы для исследования напряженно-деформированного состояния рабочей поверхности разделительных штампов методом конечно – элементного моделирования с целью оптимизации процесса листовой штамповки по энергосиловым параметрам и повышения износостойкости штампового инструмента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луценко В. А. Конечно-элементное моделирование разделительных операций листовой штамповки / В. А. Луценко, П. В. Боровик, О. А. Коваленко // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 227.*
2. Луценко В. А. Анализ напряженного состояния поверхности разделительного инструмента после упрочнения электроискровым легированием / В. А. Луценко, П. В. Боровик, О. А. Коваленко // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 3 (24). – С. 15.*
3. Табаков В. П. Определение механических характеристик износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитрида титана / В. П. Табаков, А. В. Чихранов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара, 2010. – Т. 12, № 4. – С. 292.*
4. Бульчев С. И. Определение модуля Юнга по твердости / С. И. Бульчев, А. В. Калмакова // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75, № 9. – С. 63.*
5. Шугуров А. Р. Особенности определения механических характеристик тонких пленок методом наноидентификации / А. Р. Шугуров, А. В. Панин // *Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, вып. 6. – С. 1007.*
6. Левашов Е. А. Обеспечение единства измерений физико-механических и трибологических свойств наноструктурированных поверхностей [Электронный ресурс] / Е. А. Левашов // *Мир гальванотехники. Российское издание по мировой гальванотехнике. – С. 1–9. – Режим доступа: www.GalvanicWorld.com.*
7. Фирстов С. А. Уравнение идентификации / С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань // *Доповіді національної академії наук України. – 2007. – № 12. – С. 100.*
8. RU 2344408 С2. Описание изобретения к патенту «Способ определения нормальной упругости материала металлического изделия» / Гарцман С. Д., Карпучин И. И. – Опубликовано 20.01.2009.
9. Еришов В. М. Исследования процесса ванадирования стали У8 / В. М. Еришов, О. А. Коваленко // *Збірник наукових праць ДонГТУ. – Алчевск, 2005. – № 20. – С. 271.*
10. Голиков И. Н. Ванадий в стали / И. Н. Голиков, М. И. Гольдштейн, И. И. Мурзин. – М. : *Металлургия*, 1968. – 290 с.
11. Тот Л. Карбиды и нитриды тугоплавких металлов / Л. Тот; пер. с англ. Л. Б. Дубровская; под ред. П. В. Гельда. – М. : *Мир*, 1974. – 291 с.
12. Аксенов Л. Б. Повышение износостойкости штампов из стали 5ХНМ методом электроискрового легирования / В. М. Петров, А. Е. Кудряшов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2011. – № 2. – С. 33.*
13. Аксенов А. Ф. Повышение долговечности инструмента из стали 45 электроискровым легированием / А. Д. Верхотуров, Э. А. Кульгавый и др. // *Вестник машиностроения. – 1984. – № 2. – С. 69.*
14. Коваленко О. А. Исследование влияния исходной шероховатости инструмента, упрочняемого электроискровым легированием на износостойкость штампового инструмента // *Збірник наукових праць ДонГТУ. – Алчевск, 2011. – № 35. – С. 228.*
15. Сорокин В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин. – М. : *Машиностроение*, 1989. – 637 с.
16. Гуляев А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – М. : *Металлургия*, 1986. – 647 с.
17. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – М. : *Машиностроение*, 1971. – 197 с.
18. Журавлев В. Н. *Машиностроительные стали : справочник* / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – М. : *Машиностроение*, 1981. – 390 с.

Коваленко О. А. – ст. преп. ДонГТУ;

Боровик П. В. – канд. техн. наук, доц. ДонГТУ.

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: borovikpv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.11.2011 г.