

Таким образом, удалось за счет сформированной макрогетерогенной структуры получить рабочий орган, обладающий более высокими показателями эксплуатационных характеристик на любых типах почв, так как в нем сочетается высокая износостойкость рабочей части и отсутствие хрупкого разрушения тела по крепежным отверстиям. Это значительно отличает его от известных рабочих органов почвообрабатывающих машин.

#### Литература

1. Checklist zur Mengenermittlung für den Bedarf an Original Kverneland Ersatzteilen [Electronic resource]: Products & Distribution. – Kverneland. – Mode access: <http://www.kvernelandgroup.com>.

УДК 621.7

### О ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОХИМИКОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, Б.Б. Хина

*Белорусский национальный технический университет, Минск*

**Введение.** Химико-термическая обработка (ХТО) является одним из наиболее эффективных методов повышения прочности и износостойкости поверхности деталей за счет изменения ее химического состава и структуры. Наиболее распространенным процессом ХТО остается цементация. Цементацию в твердом карбюризаторе, состоящем из древесного угля и активатора, проводят в стальных контейнерах под плавким затвором. Для газовой цементации в серийном производстве широко применяют электрическую шахтную печь Ц105, а в качестве среды используют природный газ ( $\text{CH}_4$ ) и эндогаз, состоящий из  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ . Оба процесса ХТО проводят при 900 – 950 °С в течение 5 – 10 ч для получения науглероженного диффузионного слоя толщиной 0,5 – 1,2 мм с концентрацией углерода на поверхности до 1,2 – 1,5 % масс.

Недостатком обоих методов является длительная энергозатратная выдержка при высокой температуре для получения необходимой толщины диффузионного слоя, а также отсутствие возможности локального упрочнения. Для понижения энергоемкости необходимо: а) снижать расход электроэнергии; б) уменьшать расход газа; в) использовать и развивать известные способы интенсификации процессов ХТО.

В качестве альтернативы можно использовать высокоскоростное диффузионное насыщения поверхности сталей из порошков, газовой или

жидкой среды с использованием индукционного нагрева ТВЧ. Электрохимикотермическую обработку (ЭХТО) проводят при 1000 – 1100 °С в течение нескольких минут, при этом формируется диффузионный слой толщиной 0,1 – 0,6 мм с содержанием углерода 1,2 – 1,8 % на поверхности.

Высокая скорость нагрева детали при ТВЧ обусловлена джоулевым тепловыделением при протекании в подповерхностном слое вихревых токов, которые образуются под действием переменного электромагнитного поля, и недостатком времени для развития конвективного теплообмена на внешней поверхности. Это приводит к ускорению прогрева детали по сечению и сокращению расхода электроэнергии, а также оказывает положительное влияние на структуру металла – происходит измельчение зерна. Известно, что с повышением скорости нагрева фазовые превращения смещаются в область более высоких температур. При этом существенно изменяется как кинетика, так и механизм образования аустенита. Если при медленном нагреве образование аустенита происходит только в результате диффузионных процессов, то при быстром нагреве становится возможным механизм бездиффузионного превращения. При этом из-за разности удельных объемов фаз происходит образование большого числа вакансий, что приводит к ускорению диффузии в решетке.

Наличие перегрева при фазовом превращении приводит к возрастанию роли зарождения и уменьшению роли роста зерен, что приводит, наряду с малым временем нагрева, к уменьшению размера зерна аустенита к моменту окончания превращения. При этом возможна ситуация, когда процесс будет представлять собой только зарождение большого числа центров и их рост до взаимного соприкосновения.

Уменьшение размера зерен и увеличение их числа приводит к возрастанию протяженности границ и к существенному повышению вклада зернограничной диффузии в общий диффузионный поток атомов примеси. При температурах цементации коэффициент зернограничной диффузии на пять – семь порядков выше, чем объемной [1]. Следовательно, в более мелкозернистом аустените диффузионное насыщение должно протекать значительно быстрее, чем в крупнозернистом [1, 2].

**Результаты и их обсуждение.** Цементацию при ЭХТО исследовали на образцах из стали 20, которые при нагреве ТВЧ выдерживали при 1000 – 1100 °С в течение 60 – 150 с. При этом толщина диффузионного слоя составляла 100 – 520 мкм.

После высокотемпературной цементации в течение 90 с толщина диффузионного слоя достигала 400 мкм. Слой представляет собой крупноигльчатый мартенсит и остаточный аустенит, а в сердцевине имеется перлитно-ферритная структура (рис. 1). При 1200 °С поверхностная кон-

центрация углерода увеличивается, что приводит к появлению слоя с ледебуритной структурой толщиной 30 – 40 мкм (рис. 2).

После цементации с нагревом ТВЧ наблюдается повышение микротвердости по сравнению с традиционными способами ХТО (рис. 3). Это связано с возрастанием концентрации углерода на поверхности и увеличением толщины цементованного слоя.



Рис. 1. Структура стали 20 после цементации при 1000 – 1100 °С (×300)

Рис. 2. Структура стали 20 после цементации при 1200 °С (×500)

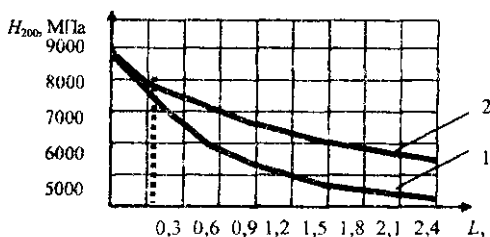


Рис. 3. Микротвердость стали 20 после высокотемпературной цементации и закалки: 1 – газовая цементация; 2 – порошковая цементация с нагрева ТВЧ

Однако после ЭХТО размер зерна диффузионного слоя составляет 3 – 4 балла, а в сердцевине 4 – 6 баллов, что снижает прочностные свойства детали. Для измельчения зерна использовано термодублирование (ТЦ), обеспечивающее многократную фазовую перекристаллизацию. При этом в диффузионном слое, состоящем из мелкоигольчатого мартенсита, размер зерна уменьшился до 9 – 11 баллов, а в сердцевине сформировалась троостосорбитная структура с размером зерна 12 – 14 баллов. Наряду с измельчением зерна наблюдается увеличение толщины диффузионного слоя (на 90 мкм при четырехкратном ТЦ) по сравнению с режимом без ТЦ, что связано с существенным возрастанием скорости диффузии углерода при фазовой перекристаллизации. Таким образом, многократная фазовая перекристаллизация при ЭХТО позволяет как интенсифицировать рост диффузионного слоя при цементации, так и измельчить структуру. Для исключе-

ния интенсивного роста зерен при высоких температурах ЭХТО целесообразно использовать легированные стали, например, 20ХНМ, 18ХГТ, 25ХГТ, 25ХГМ, 15ХГНТА, 18Х2Н4ВА и др.

**Технико-экономические показатели.** Энергетические затраты на одну деталь при получении диффузионного слоя толщиной 0,5 мм при газовой цементации и ЭХТО из порошков приведены в таблице на примере крепежных элементов почвообрабатывающей машины. При газовой цементации в печи Ц105 (мощность 105 кВт) длительность цементации составляет 5 ч при расходе природного газа  $\text{CH}_4$  0,75 м<sup>3</sup>/ч и эндогаза – 2,0 м<sup>3</sup>/ч. Для ЭХТО из порошков при мощности установки ТВЧ 66 кВт время обработки равно 2 мин, а расход порошка на одну деталь составляет 20 г при цене 8000 руб. за 1 кг.

Таблица 1

**Технико-экономические показатели процессов цементации**

Показатели расхода материалов и энергоресурсов	Фактический расход	Стоимость, руб.
<b>Газовая цементация в печи Ц105</b>		
Расход газа за 5 ч, м <sup>3</sup>	13,75	3602,5
Расход электроэнергии за 5 ч, кВт	525	97650
	<b>Итого: 101252</b>	
<b>Цементация с нагревом ТВЧ</b>		
Расход порошка, г/деталь	20	160
Расход электроэнергии за 2 мин, кВт	2,2	409,2
	<b>Итого: 570</b>	

При цене электроэнергии 186350 руб. за 1000 кВт и цене газа 262290 руб. за 1000 м<sup>3</sup> получим, что стоимость 0,5 мм диффузионного слоя при цементации в печи Ц105 составляет 101252 руб., а при ЭХТО – 570 руб.

**Заключение.** Таким образом, ХТО с нагревом ТВЧ является экономически более выгодным, чем традиционный процесс цементации. Однако метод ЭХТО является по сути штучным, и сравнивать его по производительности с серийным производством можно лишь условно. Указанный процесс может быть использован как альтернативный метод обработки таких деталей, как крепежные элементы, долота, шаровые пальцы рулевого управления, оси сателлита и др. при небольших объемах производства.

**Литература**

1. Каур, И. Диффузия по границам зерен и фаз / И. Каур, В. Густ. – М. : Машиностроение, 1991. – 448 с.
2. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций / В.Ф. Мазанко [и др.]. – М: Машиностроение, 2006. – Т. 2. – 323 с.

## ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ УЛЬТРАЧЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

О.Г. Пуровская, Л.С. Цыбульская, Т.В. Гаевская  
*НИУ «Институт прикладных физических проблем  
им. А.Н. Севченко БГУ», Минск*

Проблема снижения рассеянного светового фона видимого диапазона длин волн в оптических приборах и разработки эффективных светопоглощающих покрытий остается одной из актуальных проблем современной науки и практики создания новых материалов. В измерительных оптических приборах рассеянный свет увеличивает шумы детекторов и снижает чувствительность аппаратуры. Ультрачерные покрытия, как слабо отражающие, существенно улучшают оптические характеристики тепловых детекторов, снижают эффект побочного и рассеянного света в оптических приборах, что особенно важно при их миниатюризации.

Наиболее распространенными поглощающими покрытиями являются ультрачерные пленки на основе оксидов, гидроксидов, сульфидов никеля или меди. Для их получения используют процессы химического или электрохимического осаждения покрытий из меди или композиции никель – фосфор, с последующим их окислением в растворах сильных окислителей, например, неорганических кислот [1 – 3].

Цель данной работы состояла в получении ультрачерного покрытия на основе химически осажденного сплава Ni-P с низким коэффициентом отражения от диффузной поверхности ( $K < 3\%$ ), а также в изучении влияния различных факторов – химического состава, структуры и морфологии покрытий Ni-P на способность к окислению и степень черноты получаемых пленок.

Химическое осаждение покрытия Ni-P осуществляли при  $T = 85 - 90^\circ\text{C}$  из раствора состава (г/л):  $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 25$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} - 8 - 60$ ,  $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O} - 15$ ,  $\text{NH}_2\text{COOH} - 20$ ,  $\text{pH} = 5,2$  на алюминий и его сплавы (ДТ16Т, силумин и др.), титан, латунь. Количество фосфора в сплаве определяли спектрофотометрическим и рентгенофлуоресцентным методами. Погрешность анализа не превышала 5%. Толщину покрытия Ni-P оценивали гравиметрическим методом, черной окисленной пленки – металлографическим методом (по шлифу поперечного разреза образца). Измерения коэффициента отражения (K) от черной поверхности проводили на