

Бондаренко А.Е.

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры***ЭЛЕКТРО-МЕХАНИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Рассмотрен вопрос электромеханического упрочнения деталей. Показана принципиальная схема устройства и приведены основные режимы для упрочнения деталей с возможностью их использования применительно к деталям строительной техники.

Ключевые слова: упрочнение, электрический ток, режимы, примеры использования.

Постановка проблемы. Для повышения долговечности машин применяют различные методы упрочнения рабочих поверхностей [1, 2], которые имеют ряд различных достоинств и недостатков.

В связи с этим **целью работы** является описание электромеханического упрочнения поверхностей деталей как одного из методов, который в определенной мере подходит для обработки деталей, входящих в конструкции строительной техники. Тем более, что упрочняющая установка представляется нам достаточно простой в изготовлении и удобной для эксплуатации.

Результаты исследований. На рис. 1 приведена принципиальная схема для электро-механического упрочнения деталей. Она состоит из понижающего трансформатора, реостата в первичной обмотке для изменения и выбора режима обработки, контролирующих приборов (амперметра и вольтметра), инструмента, токосъемника и, конечно, самой детали.

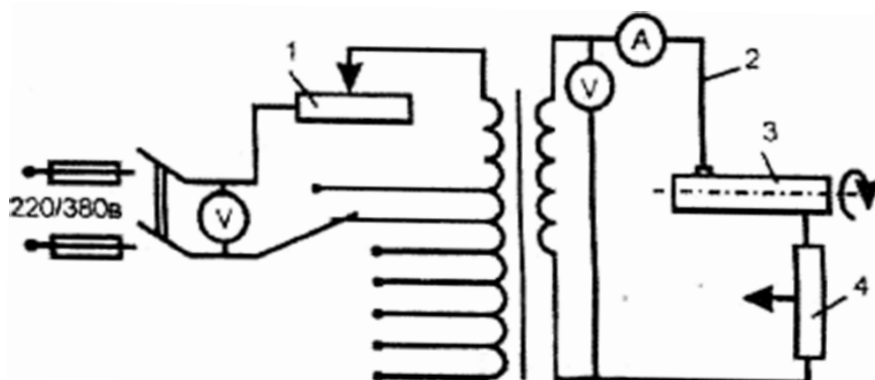


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для электро-механической обработки:
1 - реостат; 2 - вторичная обмотка; 3 – деталь; 4 – инструмент.

Необходимые режимы обработки в основном подбирают экспериментальным путем, но сначала используют рекомендуемые табличные данные и формулы [1, 2]. Однако во всех случаях выполняют упрочняющую проверку.

Для примера приведем в табл. 1 ориентировочные режимы упрочнения среднеуглеродистых конструкционных сталей.

Как следует из табл. 1, необходима большая сила тока порядка 300-600 А при глубине упрочнения до 0,10 мм. При большей глубине упрочнения до 0,30 мм сила тока достигает 800-1200 А при одном-двух проходах инструментом. Глубину упрочнения рассчитывают по формуле:

$$\delta = \frac{K\mu(0,24\eta jU + \frac{pvf}{42,7})}{cvB\rho T\Phi} \quad (1)$$

где K - коэффициент, учитывающий количество поглощаемой теплоты; в зависимости от принятых режимов обработки $K = 0,23 \div 0,26$, среднее значение коэффициента при укрупненных расчетах $K_{ср} = 0,234$;

μ - коэффициент, определяющий количество теплоты, создаваемой в зоне контакта и

отводимой в упрочняемую деталь; увеличение силы тока приводит к увеличению коэффициента μ , увеличение скорости сглаживания и давления способствует его понижению; для более высоких режимов $\mu \approx 0,6$, для менее высоких $\mu \approx 0,5$;

η - коэффициент, учитывающий потери во вторичной цепи трансформатора; для средних условий ЭМПО коэффициент $\eta \approx 0,42$;

j - сила тока вторичной цепи;

U - напряжение тока во вторичной цепи; $U = 2 \div 6$ В;

p - нормальное давление при сглаживании; при обработке конструкционных сталей $p \approx 0,3 \div 0,5$

ГПа;

v - скорость сглаживания, см/с;

f - коэффициент трения; для среднеуглеродистой стали при средних условиях ЭМПО коэффициент $f = 0,65 \div 0,75$;

c - удельная теплоемкость металла, Дж/(г·°C);

B - ширина контакта, мм;

ρ - плотность, г/см³;

$T\phi$ - температура фазового превращения металла (точка A_{c3}), °C.

Таблица 1

Режим упрочнения	Инструмент	Сила тока, А	Скорость м/мин	Подача мм/об	Параметр шероховатости, Ra	Глубина упрочненного слоя, мм	Число проходов
Чистовой, скоростной при глубине упрочнения: малой средней	Пластина	350-450 480-600	80-130 8-15	0,2-0,3	0,63-0,16	0,02-0,03 0,06-0,10	1-2 2-3
Высокий со значительной глубиной упрочнения	Ролик	800-1200	8-10	0,2-0,3	2,5-0,63	0,15-0,30	1-2

На усилие электромеханического сглаживания влияют площадь поверхности контакта инструмента с изделием и физико-механические свойства поверхностного слоя.

В свою очередь, поверхность контакта зависит в основном от исходной шероховатости и кривизны контактирующих поверхностей детали и инструмента.

В том случае, если давление $p \leq p_{расч}$ (расчетное давление), то шероховатость поверхности увеличивается; если $p > p_{расч}$, то процесс сглаживания начинает переходить в процесс высадки и появляется так называемая вторичная шероховатость.

Давление можно рассчитать по формуле:

$$P_{расч} = \omega K_p \sigma_v F \left(\frac{Rz}{Rz-a} \right)^m, \quad (2)$$

где ω - коэффициент скорости;

K_p - коэффициент пропорциональности;

σ_v - предел прочности нагретого металла;

F - площадь поверхности контакта;

Rz - параметр шероховатости сглаживаемой поверхности;

a - сближение инструмента и детали при сглаживании;

m - показатель политропы сжатия.

Значения коэффициента ω приведены в табл. 2.

Мощность (кВт) процесса сглаживания неровностей и упрочнения поверхности электромеханической пластической обработкой можно рассчитать по формуле, пренебрегая при этом величиной работы, совершаемой при подаче инструмента:

$$Nэ = Pрасчfv/(60 \cdot 120). \quad (3)$$

Таблица 2

Значения коэффициента ω

Скорость рабочего органа машины, м/мин	Температура обработки, °С		
	до 0,5 T	св. 0,5 T при неполной горячей деформации	св. 0,5 T при горячей деформации
16-42	1,10	1,4-2,4	1,2-1,6
42-125	1,15	2,4-3,0	1,6-2,0
Св. 160	1,25	3,5	2,5

Примечание. T – абсолютная температура плавления обрабатываемого материала

При выборе метода упрочнения электромеханической пластической обработкой и установлении режимов этой обработки учитывают состояние исходной структуры металла, его дисперсность и химический состав. Мелкозернистая структура, обладая большим сопротивлением и большей суммарной поверхностью раздела, способствует более интенсивному выделению теплоты, лучшей растворимости легирующих элементов, карбидов и нитридов, а также более глубокой прокаливаемости поверхностного слоя, отличается меньшей электрической проводимостью. По мере увеличения температуры отпуска электрическая проводимость закаленной стали повышается, что связано с понижением степени дисперсности ее структуры.

Отдельные составляющие структуры поликристаллов (например, перлит, феррит и цементит) обладают различным сопротивлением прохождению тока. Наибольшее сжатие силового потока и наиболее высокая температура возникают по границам различных включений или пор. Это обстоятельство имеет большое значение при обработке поверхностных слоев, образованных при восстановлении деталей наплавкой и металлизацией и содержащих много пор и других объемных дефектов.

Если обработку проводят на режиме, при котором отсутствуют фазовые превращения и поверхностный слой имеет темный цвет, то температуру обработки принимают ниже 0,5 T_{ϕ} (T_{ϕ} – температура фазовых превращений). В том случае, когда обработку проводят с фазовыми превращениями, поверхностный слой светлый, но переходный слой имеет ярко выраженную завихренность (текстурированность), температуру обработки можно принять выше 0,5 T_{ϕ} при неполной горячей деформации. При наличии фазовых превращений в поверхностном слое и резком переходе к исходной структуре без заметной завихренности температура обработки должна быть выше 0,5 T_{ϕ} (горячая деформация).

При высоких температурах и значительных давлениях в процессе ЭМПО возможно появление растягивающих остаточных напряжений в светлом поверхностном слое обрабатываемой стали, несмотря на мартенситное строение его структуры. При умеренных температурах (ниже $A_{с3}$) и небольших давлениях в мартенситной структуре могут появиться сжимающие остаточные напряжения.

При высокотемпературной деформации, когда температура процесса выше $A_{с3}$, возникает горячий наклеп металла. В результате деформированные зерна приобретают мелкодисперсное строение, уплотняются и частично срастаются, диффузионно свариваются и соединяются между собой. Поверхностный слой принимает темный цвет. Такой слой металла характеризуется уменьшением начального объема и, следовательно, появлением растягивающих остаточных напряжений.

Давление обрабатывающей пластины при ЭМПО создает тангенциально направленную силу трения, которая способствует вытягиванию наружных слоев металла, возникновению растягивающих остаточных напряжений. Избежать этого можно в случае применения вращающегося ролика вместо пластины.

Многократное термомеханическое воздействие на поверхностный слой стальной детали способствует созданию более мелкой, однородной и плотной структуры. При многократном воздействии, характеризующемся числом проходов инструмента по упрочняемой поверхности, показатель политропа сжатия можно рассчитать по формуле:

$$m = \frac{IN}{S}, \quad (4)$$

где l - длина контакта инструмента с деталью, мм;
 N - число повторных ходов;
 S - подача, мм/об.

Твердость упрочненного поверхностного слоя зависит от числа проходов инструмента, скорости сглаживания (скорости пластического деформирования), давления на поверхность в точке (зоне) контакта, а также от физико-химических особенностей металла обрабатываемой детали. При прочих равных условиях твердость возрастает с увеличением количества углерода в стали, числа проходов инструментом и давления на инструмент.

Наибольшей твердостью обладает поверхностный слой глубиной 0,02-0,1 мм. Зависимость твердости поверхностного слоя стальных деталей после упрочнения ЭМПО от перечисленных факторов приведена на рис. 2.

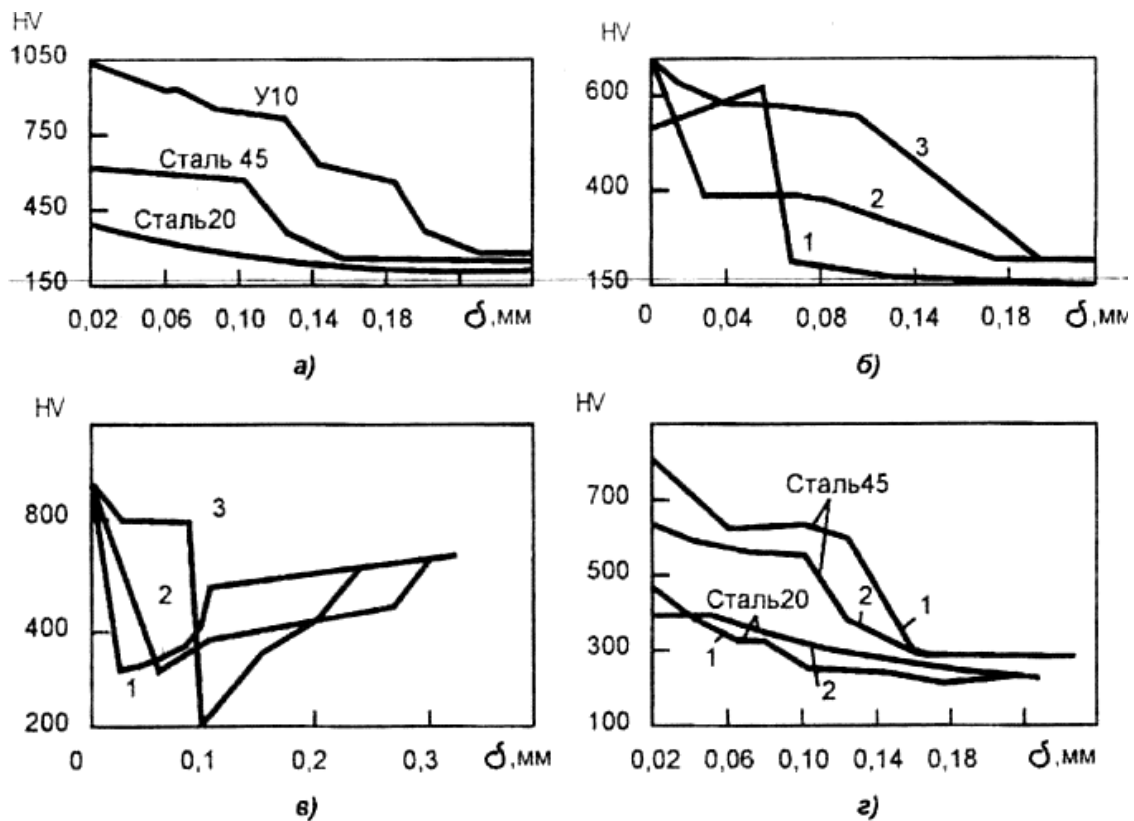


Рис. 2. Зависимость твердости поверхностного слоя от содержания углерода в стали (а), числа проходов инструмента (б), скорости сглаживания (скорости упрочняющей пластической деформации) (в) и давления на инструмент (з): а - $p = 700$ Па; $I = 600$ А; $v = 3,2$ м/мин; $S = 0,195$ мм/об; б - сталь 40Х, 318 НВ, $I = 710$ А, $v = 8$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об; в - сталь 40Х, 536 НВ, $I = 470$ А, $p = 500$ Па, $S = 0,2$ мм/об; на рис. б и в: 1 - $v = 82,2$ м/мин; 2 - $v = 54,1$ м/мин; 3 - $v = 13,6$ м/мин; 2 - $I = 600$ А; $v = 3,2$ м/мин; $S = 0,195$ мм/об (1 - $p = 100$ Па; 2 - $p = 700$ Па)

В качестве неподвижного жестко закрепленного инструмента применяют пластины или ролики твердого сплава Т15К6 с двойным радиусом скругления торца; например, $R = 25 \div 40$ мм, $r = 15$, где R - радиус в плане; r - радиус профиля пластины (ролика).

При одинаковых режимах ЭМПО глубина упрочненного слоя выше при сглаживании неподвижным инструментом. В этом случае имеет место трение скольжения, что приводит к образованию завихренной текстуры и более интенсивному измельчению структуры поверхностного слоя.

Детали, упрочненные неподвижным инструментом, по сравнению с деталями, упрочненными подвижным инструментом, обладают большей выносливостью и износостойкостью. При работе неподвижным инструментом, имеющим радиусный профиль, на нем быстро образуется площадка.

Поэтому на радиусе нужно выполнить поясок шириной 0,5 мм, что в несколько раз увеличивает стойкость инструмента. Перед каждой очередной операцией инструмент-ролик поворачивают на угол 10-15° для обновления поверхности контакта.

К недостаткам неподвижного инструмента относится его сравнительно небольшая стойкость. Поэтому он находит применение при обработке небольших поверхностей типа шеек валов. При упрочнении валов диаметром 60-100 мм из среднеуглеродистых нормализованных сталей с параметрами шероховатости $Ra - 0,63 \div 0,08$ мкм профильный радиус ролика диаметром 45 мм может быть принят равным 15 мм. Режим обработки: сила тока $I = 400-450$ А, подача $S = 0,21$ мм/об, сила прижатия $P = 500 \div 700$ Н.

Упрочнение колец диаметром 60-100 мм, изготовленных, например, из отожженной стали 40Х, можно осуществить неподвижной пластиной из твердого сплава Т15К6 (геометрия пластины: $R = 30$ мм, $r = 15$ мм) при следующем режиме обработки: $I = 400$ А, $v = 6,5$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об, $P = 200$ Н.

Для повышения стойкости инструмента подача при ЭМПО не должна совпадать с подачей, применявшейся при резании. Целесообразно при этом использовать охлаждение сжатым воздухом, эмульсией или любой пожаробезопасной смазочно-охлаждающей средой.

Например, предварительную обточку под сглаживание выполняют при режиме резания

$$v = 120 \div 430 \text{ м/мин}, t = 0,3 \text{ мм}, S = 0,17 \text{ мм/об}$$

резцом из сплава Т15К6, имеющим следующую геометрию:

$$\gamma = 5^\circ, \alpha = 8^\circ, \varphi = 45^\circ, \varphi_1 = 30^\circ, r = 0,5 \text{ мм}.$$

После предварительной токарной обработки параметры шероховатости поверхности соответствуют $Rz = 40 \div 10$ мкм. Поэтому последующее выполнение операции выглаживания на указанных выше режимах будет эффективным при достаточной стойкости инструмента.

При чистовой обработке нежелательно возникновение схватывания контактируемых материалов, так как это ведет к образованию нароста на твердом сплаве и резкому увеличению шероховатости поверхности. Поэтому при изготовлении деформирующего инструмента твердые сплавы типа ВК, обладающие большой склонностью к схватыванию, следует заменять сплавами типа ТК.

Преимущества вращающегося ролика: высокая стойкость, возможность упрочнения деталей на большую глубину. Вращающийся ролик применяют при обработке больших поверхностей, когда не предъявляют высоких требований к их волнистости, а также во всех случаях при обработке чугуна.

Процесс ЭМПО выполняют при постоянном токе. Источниками постоянного тока могут быть мощные низковольтные выпрямители, электромашинные преобразователи, генераторы постоянного тока, сварочные трансформаторы, трансформаторы машин для точечной и контактной сварки и др. При выборе мощности трансформатора следует учитывать продолжительность его включения. При ЭМПО она может достигать 30-50%, что неизбежно отразится на увеличении необходимой номинальной мощности.

Для многих процессов упрочнения ЭМПО, в особенности при одновременном использовании нескольких инструментов, а также при обработке крупногабаритных деталей требуется большая мощность источника тока. Необходимая сила тока во вторичном контуре может достигать 2000-3000 А и выше. В этих случаях наиболее подходящими являются трансформаторы для контактной сварки мощностью 25-50 кВт. Диапазон их регулирования при установлении режима процесса может быть расширен введением в первичную цепь трансформатора напряжения 220/380 В.

Более плавное регулирование силы тока может быть осуществлено реостатом, который устанавливают в первичную цепь трансформатора. В генераторах постоянного тока регулирование силы тока можно производить реостатом, включенным в цепь возбуждения.

При использовании выпрямителей, регулирование силы тока может быть осуществлено с помощью введенного в питающую сеть специального автотрансформатора или с помощью мощного ступенчатого реостата, включаемого последовательно в низковольтную цепь (например, от 0,015 до 2 Ом).

Выводы.

1. Рассмотрен вопрос о возможности использования электро-механического упрочнения для повышения долговечности деталей строительной техники.
2. Приведена принципиальная схема устройства для ЭМПО и рекомендуемые режимы для обработки.

2. Євдокимова А.М., Євдокимов В.Д. Технологія механічної обробки металів.-Одеса: Інтерпринт, 2015.-552 с.

REFERENCES

1. Polevoy, S., Evdokimov, V. (1994). *Hardening of machine-building materials [Uprochnenie maschinostroitelnykh materialov]:* References.-2 nd ed. redressed and augmentation. Moscow, Mashinostroenie Publ. 446 p.
2. Evdokimova, A., Evdokimov, V. (2015). *Machining technology processing of metals [Tehnologiya mehanichnoyi obrobki metalov].* Odessa: Interprynt Publ. 552 p.

Бондаренко А.Є. Електро-механічне зміцнення та його можливості для підвищення довговічності деталей будівельної техніки.

Розглянуто питання електро-механічного зміцнення деталей. Показана принципова схема пристрою і приведені основні режими для зміцнення деталей з можливістю їх використання стосовно деталей будівельної техніки.

Ключові слова: зміцнення, електричний струм, режими, приклади використання.

Bondarenko A. Electro-mechanical hardening and its ability to improve the durability of the construction machinery parts.

Considered electromechanical hardening of parts. A schematic diagram of the device and shows the main modes for hardening of parts with the possibility of their use for construction machinery parts.

Keywords: hardening, electric current, modes, and examples of usage.

АВТОР:

БОНДАРЕНКО Андрій Єгорович, кандидат технічних наук, завідувач кафедри «Підйомно-транспортні, будівельні та дорожні машини», Одеська державна академія будівництва і архітектури, e-mail: gorlovbond@yandex.ru

АВТОР:

БОНДАРЕНКО Андрей Егорович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины», Одесская государственная академия строительства и архитектуры, e-mail: gorlovbond@yandex.ru

AUTHORS:

Andrey BONDARENKO, PhD. in Engineering, Head of the Department "Hoisting-and-transport, construction and road machines", Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, e-mail: gorlovbond@yandex.ru

Стаття надійшла в редакцію 28.05.2017 р.