



Мазур В. А.

## ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

*Исследованы структура и свойства стали 35ХМЛ после плазменного упрочнения, выявлены механизмы, влияющие на формирование фазового состава и остаточных напряжений после поверхностной обработки. Экспериментально определены остаточные напряжения в поверхностном слое. Проведено моделирование распределения деформаций в заданной детали от действия высококонцентрированного источника энергии. Выполнено упрочнение детали из данной стали по заданным режимам и произведен контроль точности.*

**Ключевые слова:** плазма, напряжения, деформация, структура, фазовый состав, модель, элемент, свойства, эксплуатация.

### 1. Введение

Плазменная поверхностная обработка конструкционных и инструментальных сталей, благодаря задействованию различных механизмов упрочнения материалов, позволяет значительно повысить комплекс эксплуатационных свойств (износостойкость, теплостойкость, трещиностойкость) по сравнению с традиционными технологиями объемного и поверхностного упрочнения инструмента (печная закалка, закалка ТВЧ) [1].

Достижимый уровень эксплуатационных свойств при упрочнении сталей и сплавов ВКИН наряду с такими характеристиками, как дисперсность структуры, фазовый состав и параметры кристаллической решетки, в значительной степени зависит и от характера распределения, величины и знака остаточных напряжений, а точность обработанных деталей (особенно сложной формы) зависит от термических деформаций, возникающих при плазменном нагреве.

Актуальной задачей является определение таких режимов плазменной обработки, при которых будет сочетаться как получение поверхности с требуемым уровнем эксплуатационных свойств, так и сохранение требуемой точности детали.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В настоящее время в достаточной степени изучены процессы образования остаточной деформации при применении различных способов поверхностного упрочнения: поверхностного пластического деформирования [2], упрочняющего напыления и наплавки [3, 4], при лазерном упрочнении как с оплавлением, так и без оплавления поверхности [5]. Для случая плазменной обработки такие данные получены применительно к упрочнению как без оплавления, так

и с оплавлением поверхности инструментальных сталей и сплавов [6, 7].

Деформация деталей при поверхностном упрочнении высоко концентрированными источниками нагрева зависит от характера распределения и уровня напряжений как структурных, так и термических.

В настоящее время эти процессы чаще всего рассматриваются отдельно друг от друга. Экспериментально определяются остаточные напряжения связанные со структурными и фазовыми превращениями при нагреве [5, 6]. Для определения характера распределения термических макронапряжений чаще используются численные методы [8, 9], конечноэлементное моделирование процессов распределения тепла и деформаций [10].

### 3. Объект, цель и задачи исследования

*Объект исследования* — изучение напряженно-деформированного состояния деталей машин после обработки их поверхности высококонцентрированной плазменной струей. В качестве объекта исследования выступала гильза сложной формы, выполненная из стали 35ХМЛ.

*Цель исследования* — определить диапазон режимов и технологических приемов плазменного упрочнения, позволяющих обеспечить высокий уровень эксплуатационных свойств поверхностного упрочненного слоя при обеспечении заданной точности.

*Задачи исследования* — исследовалось формирование фазового и структурного состава, а следовательно, и характер формирования микронапряжений в поверхности детали при плазменном упрочнении, рассчитывались макронапряжения и деформации детали с помощью конечно элементного моделирования, проводилось практическое опробование технологии плазменной обработки гильзы из стали 35ХМЛ, проводились замеры детали для определения отклонений от цилиндричности исследуемых поверхностей до и после обработки.

#### 4. Материалы и методы исследования влияния плазменного поверхностного упрочнения на напряженно-деформированное состояние изделия

**4.1. Материалы и оборудование, используемое в эксперименте.** Производилось упрочнение рабочих поверхностей гильзы  $\varnothing 320$  и  $\varnothing 370$  мм (рис. 1). Твердость упрочненной поверхности контролировалась портативным твердомером AL-150A. Контроль цилиндричности производился нутромером.

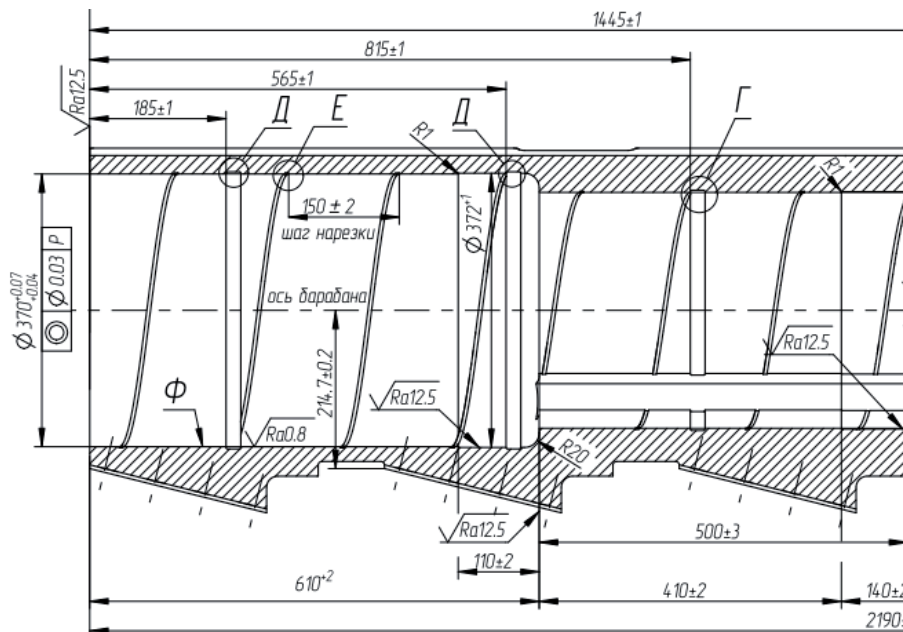


Рис. 1. Фрагмент гильзы с обрабатываемым участком  $\varnothing 370$  мм

Для исследования величины и характера распределения остаточных напряжений при плазменной обработке образцы из стали 35ХМЛ размером  $20 \times 20 \times 40$  мм подвергали плазменной обработке. Обработку выполняли без оплавления, с незначительным оплавлением поверхности и значительным оплавлением поверхности. Рентгеновскую съемку образцов проводили на дифрактометре ДРОН-3,0. Моделирование плазменного нагрева гильзы проводилось с помощью FEMAP MSC.Nastran.

**4.2. Методика определения показателей свойств объекта.** Величину и характер распределения остаточных напряжений по глубине упрочненной зоны определяли рентгеноструктурным анализом на поперечных микрошлифах с применением  $\sin^2\psi$ -метода.

Рентгеновскую съемку образцов проводили на дифрактометре ДРОН-3,0 в железном  $K_{\alpha}$  излучении при непрерывной записи отражений от плоскости (211)  $\alpha$ -фазы. Остаточные напряжения определяли по формуле:

$$\sigma_{ост} = \frac{E}{\nu} \cdot \left( 1 - \frac{\sin \theta_s}{\sin \theta_0} \right), \quad (1)$$

где  $E, \nu$  — соответственно модули упругости и коэффициент Пуассона для марок стали;  $\theta_s, \theta_0$  — угол отражения кристаллографической плоскости в кристаллической решетке образца эталона и исследуемого образца.

Величины макронапряжений определяли расчетным путем с использованием конечно элементного моделирования.

В MSC.Nastran все задачи формулируются в перемещениях с применением лагранжевого подхода. Предполагается, что в начальный момент  $t_0$  в рассматриваемом теле перемещения  $U_i(\vec{x}, t_0)$ , деформации  $\epsilon_{ij}(\vec{x}, t_0)$ , напряжение  $(\sigma_{mn})_0 = \sigma_{mn}(\vec{x}, t_0)$  имеют нулевые значения, известно начальное поле температур  $T_0 = T(\vec{x}, t_0)$ . Компоненты тензора температурной деформации рассчитываются по формуле:

$$\epsilon_{ij}^T = (\alpha_{ij})_T \Delta T, \quad (2)$$

$$\Delta T = T - T_{ref}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{ij}$  — коэффициент линейного температурного расширения;  $T_{ref}$  — температура, при которой тепловая деформация отсутствует.

Для уточнения расчетов коэффициент линейного температурного расширения принимается зависящим от температуры.

Варьируя параметры режима плазменного упрочнения (сила тока, расход плазмообразующего газа, скорость относительного перемещения плазмотрона и детали) формировали тепловой поток различной мощности. Получали соответствующее распределение температур в обрабатываемом

теле и интерпретировали в термические напряжения и деформации. Таким образом, получали диапазон режимов, обеспечивающих требуемые свойства и характеристики поверхности детали.

#### 5. Результаты исследований структуры, фазового состава и напряженно-деформированного состояния упрочненной поверхности

Структурные напряжения при плазменной обработке по различным технологическим схемам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Распределения напряжений по глубине упрочненного слоя

Вариант упрочнения	Участок замера	$\sigma_{ост}$ , МПа
Без оплавления, либо с незначительным оплавлением	Поверхность образца	-780
	Средняя часть упрочненной зоны	-1170
	Переходная зона	+520
	Исходный металл	+40
Со значительным оплавлением поверхности	Поверхность образца	+420
	Средняя часть упрочненной зоны	-875
	Переходная зона	+690
	Исходный металл	+80

При плазменной обработке со значительным оплавлением поверхности в оплавленном слое фиксируются растягивающие остаточные напряжения, которые на границе с закаленным слоем скачкообразно уменьшаются и переходят в сжимающие, а далее на границе с исходным металлом вновь скачкообразно переходят в растягивающие и постепенно уменьшаются до нуля при продвижении вглубь основного металла.

При обработке стали 35ХМЛ с незначительным оплавлением либо без оплавления фиксируются сжимающие остаточные напряжения, плавно увеличивающиеся от поверхности оплавленного слоя в глубину и достигающие максимума также в центральной части слоя закалки в твердом состоянии. На границе закаленного слоя с исходным металлом сжимающие напряжения меняют знак и переходят в растягивающие.

Для определения термических макронапряжений строилась модель (рис. 2), состоящая из 6-и узловых конечных элементов. После определения свойств модели, граничных и конечных условий, тепловых нагрузок производился расчет термических напряжений и деформаций детали (рис. 3).

Расчеты показали, что при обработке детали без оплавления поверхности уровень остаточных деформаций будет соответствовать требованиям точности, предъявляемым к гильзе. Контрольные замеры отклонения от цилиндричности после плазменной обработки по выбранным режимам подтвердили полученные расчетные данные.

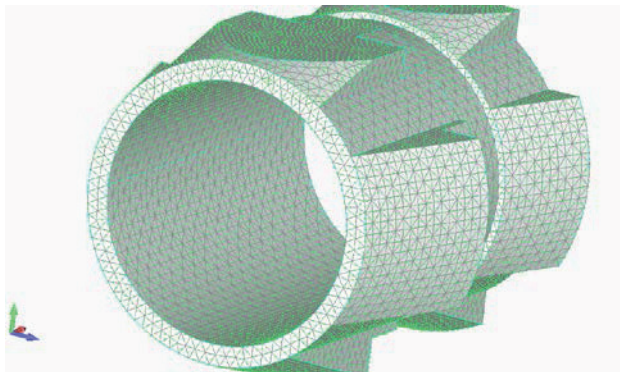


Рис. 2. Модель гильзы, разбитая на 6-и узловые элементы

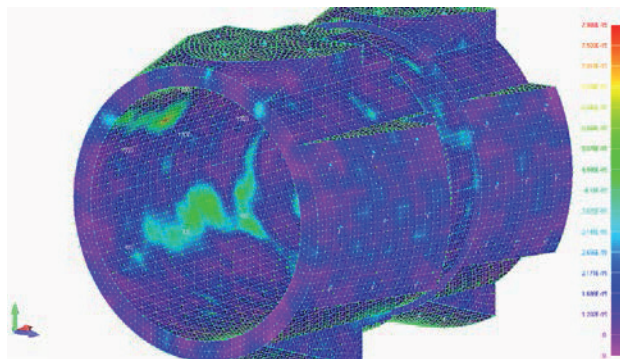


Рис. 3. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния гильзы после плазменного упрочнения

Результаты проведения контрольных замеров диаметров рабочих поверхностей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Контроль геометрических параметров детали после плазменного упрочнения

Диаметр отв.	№	Замер диаметров				
		1	2	3	4	5
Ø 320	1	320,05/3	320,16/13	320,20/16	320,20/13	320,22/22
	2	320,10/10	320,05/2	320,12/10	320,0/3	320,0/2
	3	320,15/12	320,07/06	320,11/3	320,21/18	320,07/3
	4	320,07/5	320,15/12	320,11/8	320,21/18	320,07/3
Ø 370	1	370,30/30	370,32/32	327,19/15	—	—
	2	370,15/15	370,20/04	370,19/15	—	—
	3	370,30/25	370,13/07	370,40/30	—	—
	4	370,09/18	370,16/15	370,12/10	—	—

В знаменателе показатели отклонения от цилиндричности в мкм.

## 6. Обсуждение результатов исследования формирования фазового и структурного состава, характера и величины термических и структурных напряжений и деформаций

В общем случае при поверхностной обработке стальной детали остаточные макронапряжения являются алгебраической суммой напряжений двух видов — термических, вызванных неравномерным распределением температуры по сечению изделия, и структурных, связанных с изменением объема в результате фазовых переходов «жидкость  $\leftrightarrow$   $\gamma$   $\leftrightarrow$   $\alpha$ ». Конечная величина результирующих остаточных напряжений зависит от состава стали, режима и технологии обработки.

В исходном состоянии сталь 35ХМЛ имеет структуру зернистого перлита + феррит в виде островков. Исследования показывают, что при концентрированном нагреве стали 35ХМЛ мощной плазменной струей основной структурной составляющей зоны плазменной закалки является мартенсит. Независимо от исходного состояния стали он характеризуется очень высокой степенью дисперсности (т. н. бесструктурный мартенсит).

В верхних участках ЗПВ, где температура нагрева и скорость охлаждения наиболее высокие,  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение идет по сдвиговому механизму. Вместе с тем, высокая степень дисперсности и однородность структуры, высокая твердость закаленной зоны свидетельствуют, что независимо от механизма фазового перехода существенную роль при плазменной закалке играет диффузионное перераспределение углерода в аустените. Но ввиду очень высокой скорости нагрева и охлаждения, крайне малой длительности выдержки гомогенизация аустенита в полной мере не успевает пройти, и высокодисперсный аустенит сохраняет определенную химическую неоднородность по углероду.

Важной особенностью плазменной закалки доэвтектоидных сталей является также замедление процессов рекристаллизации и полигонизации, что создает дополнительные источники (зародыши) образования аустенита — границы блоков и дефекты кристаллической решетки. Образующиеся мелкие зерна аустенита имеют

общую ориентировку в пределах исходных зерен феррита (и, соответственно, бывшего аустенитного зерна).

При повышении температуры нагрева и увеличении объема ванны жидкого металла (при плазменном макрооплавлении) в условиях скоростной кристаллизации образуется литая структура с равноосными кристаллами — вырожденными дендритами. При обработке же с микрооплавлением, когда объем расплавленного металла уменьшается, а скорость охлаждения при кристаллизации расплава увеличивается практически на порядок (от  $10^4$  °C/с до  $10^5$  °C/с), происходит вырождение дендритных форм кристаллизации и образование дисперсной ячеистой мартенситно-аустенитной структуры.

Качественное изменение механизма кристаллизации сопровождается качественным изменением характера распределения остаточных напряжений в упрочненной зоне на стали 35ХМЛ при переходе от обработки со значительным оплавлением к обработке с незначительным оплавлением либо без оплавления (табл. 1).

Получение полной картины напряженно-деформированного состояния изделия возможно с комплексным учетом не только структурных, но и термических напряжений. При расчете термических макронапряжений необходимо максимально приблизить параметры модели к реальным условиям (учет влияния переменного характера теплофизических свойств обрабатываемого материала).

## 7. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Подтверждена возможность повышения эксплуатационных свойств и работоспособности заданных поверхностей упрочняемой детали с помощью плазменной обработки.

2. Изучены механизмы формирования структуры и фазового состава заданного класса сталей, качественный и количественный уровень структурных и термических напряжений и деформаций. Определен диапазон режимов плазменной обработки, позволяющий минимизировать геометрические отклонения обрабатываемых поверхностей.

3. Проведены производственные испытания упрочненного изделия. Контрольные измерения геометрических параметров обработанных поверхностей показали их соответствие требованиям, предъявляемым к уровню эксплуатационных свойств и геометрической точности.

## Литература

- Самотугин, С. С. Плазменное упрочнение инструментальных материалов [Текст] / С. С. Самотугин, Л. К. Лещинский. — Донецк: Новый мир, 2002. — 338 с.
- Radhakrishnan, V. M. Relaxation of residual stress with fatigue loading [Text] / V. M. Radhakrishnan, C. R. Prasad // Engineering Fracture Mechanics. — 1976. — Vol. 8, № 4. — P. 593–597. doi:10.1016/0013-7944(76)90033-3
- Барвинок, В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий [Текст] / В. А. Барвинок. — М.: Машиностроение, 1990. — 384 с.
- Dong, P. Residual Stress Analyses of a Multi-Pass Girth Weld: 3-D Special Shell Versus Axisymmetric Models [Text] / P. Dong // Journal of Pressure Vessel Technology. — Vol. 123, № 2. — P. 207–213. doi:10.1115/1.1359527
- Solina, A. Residual stresses induced by localized laser hardening treatments on steels and cast iron [Text] / A. Solina, M. de Sanctis, L. Paganini, P. Coppa // Journal of Heat Treating. — 1986. — Vol. 4, № 3. — P. 272–280. doi:10.1007/bf02833305
- Leshchinsky, L. K. Mechanical properties of plasma-hardened 5 %-chromium tool steel deposited by arc welding [Text] / L. K. Leshchinsky, S. S. Samotugin // Welding Journal. — 2001. — № 1. — P. 25–30.
- Самотугин, С. С. Остаточные напряжения в инструментальных сталях после плазменного упрочнения с оплавлением поверхности [Текст] / С. С. Самотугин, В. А. Мазур // Сварочное производство. — 2006. — № 8. — С. 20–26.
- Barroso, A. Prediction of welding residual stresses and displacements by simplified models. Experimental validation [Text] / A. Barroso, J. Cañas, R. Picón, F. París, C. Méndez, I. Unanue // Materials & Design. — 2010. — Vol. 31, № 3. — P. 1338–1349. doi:10.1016/j.matdes.2009.09.006
- Withers, P. J. Residual stress. Part 2 — Nature and origins [Text] / P. J. Withers, H. K. D. H. Bhadeshia // Materials Science and Technology. — 2001. — Vol. 17, № 4. — P. 366–375. doi:10.1179/026708301101510087
- Heinze, C. Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding [Text] / C. Heinze, C. Schwenk, M. Rethmeier // Journal of Constructional Steel Research. — 2012. — Vol. 72. — P. 12–19. doi:10.1016/j.jcsr.2011.08.011

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ ПІСЛЯ ПЛАЗМОВОГО ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ

Досліджено структуру та властивості сталі 35ХМЛ після плазмового зміцнення, виявлено механізми, що впливають на формування фазового складу та залишкових напруг після поверхневої обробки. Експериментально визначені залишкові напруги в поверхневому шарі. Проведено моделювання розподілу деформацій в заданій деталі від дії висококонцентрованого джерела енергії. Виконано зміцнення деталі з даної сталі по визначеним режимам і проведений контроль точності.

**Ключові слова:** плазма, напруги, деформація, структура, фазовий склад, модель, елемент, властивості, експлуатація.

*Мазур Владислав Александрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра металорежущих станків и інструментов, ГВУЗ Приазовський державний технічний університет, Маріуполь, Україна, e-mail: v.a.mazurini@gmail.com.*

*Мазур Владислав Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра металорізальних верстатів та інструментів, ДВНЗ Приазовський державний технічний університет, Маріуполь, Україна.*

*Mazyr Vladislav, Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine, e-mail: v.a.mazurini@gmail.com*