

## ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЯХ

*Цель работы* состоит в повышении работоспособности плазменных покрытий путем поиска условий снижения остаточных напряжений. Для достижения цели выполнена разработка метода определения остаточных напряжений в зависимости от характеристик прочности и толщины покрытия.

*Методы исследования.* Измерения механических свойств покрытий при испытании на изгиб. Анализ результатов измерений прочности покрытий.

*Полученные результаты.* Предложен метод определения остаточных напряжений путем использования результатов измерений механических характеристик плазменного покрытия. Исследованы механические характеристики порошкового хромоникелевого покрытия при испытании на изгиб. Обнаружено отличие когезионной прочности внешних и внутренних слоев покрытия. Для расчета остаточных напряжений использовались полученные значения когезионной прочности отслоенного покрытия и несущей способности покрытия сцепленного с подложкой. Показано, что для покрытия сцепленного с подложкой, несущая способность меньше когезионной прочности. Обосновано предположение о том, что остаточное напряжение определяется разностью между когезионной прочностью и несущей способностью покрытия. Найдено распределение остаточных напряжений по толщине плазменного покрытия и величину остаточного напряжения в зоне контакта с подложкой.

*Научна новизна.* Показано, что когезионная прочность превосходит прочность покрытия сцепленного с подложкой на величину остаточного напряжения. Найдена зависимость остаточного напряжения и несущей способности от толщины покрытия.

*Практическая ценность.* Полученные результаты измерений когезионной прочности и остаточного напряжения позволяют обосновать надежность применения плазменных покрытий и анализировать данные измерений прочности с целью определения работоспособности деталей.

*Ключевые слова:* плазменное покрытие, механическое напряжение, когезионная прочность, остаточное напряжение, градиент, относительная деформация, модуль упругости, несущая способность.

### Введение

Использование плазменных покрытий для восстановления и упрочнения деталей машин ограничивается недостаточной прочностью и возможностью растрескивания покрытий под действием остаточных термических напряжений. Работоспособность покрытия определяется не только прочностью сцепления, но и, в значительной мере, его когезионной прочностью. Наиболее опасными являются растягивающие напряжения, для которых прочность покрытий в несколько раз ниже, чем при сжатии. Растягивающие остаточные напряжения направлены вдоль поверхности подложки и возникают вследствие отличия температуры осаждения покрытия от температуры подложки. Поэтому вопросы повышения прочности плазменных покрытий, разработка методик измерения механических характеристик и остаточных напряжений в зависимости от толщины покрытия и технологических режимов напыления являются актуальными для расширения номенклатуры деталей, подлежащих плазменной обработке.

### Анализ исследований и публикаций

В процессе плазменного напыления частицы порошка разогреваются в плазменной струе до температур, существенно превышающих температуру плавления, и прилипают к шероховатой поверхности детали, образуя слой плазменного покрытия. Нанесение порошкового покрытия выполнялось на установке Метко 9МВМ при токе плазмотрона 450 А, напряжении на дуге 50 В, дистанции напыления 100 мм, расходе аргона 42 л / мин. Микрошлиф покрытия, изображенный на рис. 1, показывает наличие внутренних дефектов, таких как пористость и существование оксидных слоев, как на границе с подложкой, так и между слоями покрытия. Наличие указанных дефектов приводит к снижению когезионной прочности покрытия в несколько раз по сравнению с прочностью компактного материала. Установлено, что прочность плазменных покрытий в несколько раз ниже прочности компактного материала подложки [1–3].

Кроме того, действие растягивающих остаточных термических напряжений приводит к снижению прочности покрытия, сцепленного с подложкой. При возрастании толщины покрытий остаточные напряжения увеличиваются, что может привести к растрескиванию покрытий [4–5].

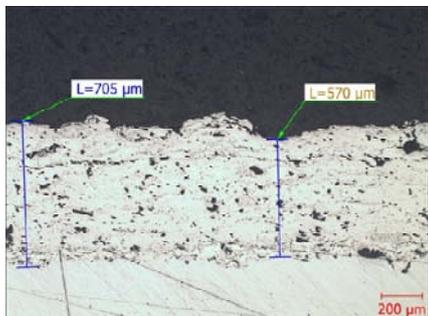


Рис. 1. Микршлиф покрытия ПРНХ15СР2

Для определения остаточных напряжений в плазменных покрытиях используется метод измерения изгибной температурной деформации подложки [4–6], метод удаления верхних слоев покрытия путем стравливания [7] и рентгеновский дифракционный метод [8]. Однако эти методы не дают связи между величиной остаточных напряжений и характеристиками прочности покрытия. Для определения остаточного напряжения в работе рассмотрена зависимость между когезионной прочностью покрытия и его несущей способностью в состоянии, сцепленном с подложкой. В случае, когда остаточное напряжение достигают величины когезионной прочности, происходит разрушение и отслоение покрытия. Поэтому остаточное термическое напряжение является важной характеристикой работоспособности покрытия.

### Цель работы

Цель работы состоит в повышении работоспособности плазменных покрытий путем снижения остаточных напряжений. Для достижения цели выполнена разработка метода определения остаточных напряжений в зависимости от характеристик прочности и толщины покрытия.

### Характеристики прочности покрытия и их измерение, анализ полученных результатов

Причиной возникновения остаточных напряжений является неравномерность температуры покрытия относительно температуры массивной подложки. Существует два вида неравномерности, отличающиеся по времени релаксации температуры. Первый вид неравномерности связан с нагревом покрытия в течение всего процесса плазменной обработки. Второй вид неравномерности связан с нестационарным температурным полем в зоне контакта отдельной частицы. Поэтому в покрытии можно выделить остаточные напряжения первого рода и контактные остаточные напряжения,

которые отличаются размерами зон воздействия. Остаточные напряжения первого рода существуют в объеме всего покрытия, а контактные остаточные напряжения уравниваются в окрестности одной частицы.

Когезионная прочность  $\sigma_k$  зависит как от прочности частиц, образующих покрытие, так и от прочности связи между частицами. Обычно прочности связи между частицами намного меньше прочности отдельных частиц, поэтому прочность покрытия, или когезионная прочность, значительно меньше прочности компактного материала. Для измерения когезионной прочности используется отслоенное покрытие, которое свободно от внутренних напряжений, возникающих при сцеплении с подложкой. Наиболее простым и достоверным измерением механических свойств покрытий являются испытания на изгиб. Рассмотрено изменение предела прочности, относительной деформации и модуля упругости при консольном изгибе образца отслоенного плазменного покрытия. Выполнены измерения перемещения свободного конца стержня в зависимости от приложенной поперечной силы. Схема приложения силы при испытании покрытия показана на рис. 2.

Зависимость перемещения от действующей поперечной силы определяется формулой Максвелла

$$y = \frac{Pl^3}{3EI}, \quad (1)$$

где  $P$  – поперечная сила, приложенная на конце стержня длиной  $l$ ,  $E$  – модуль упругости,  $I$  – момент инерции поперечного сечения образца.

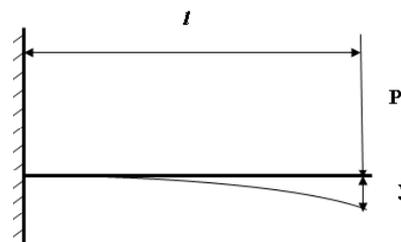


Рис. 2. Схема нагружения покрытия при изгибе

Использование формулы (1) позволяет определить величину модуля упругости образца в зависимости от перемещения свободного конца

$$y = \frac{Pl^3}{3EI}, \quad (2)$$

Для определения максимальных нормальных напряжений на поверхности образца при консольном изгибе использовалась формула:

$$\sigma = \frac{Pl}{W}, \quad (3)$$

где  $W = bh^2/6$  – момент сопротивления квадратного сечения образца,  $b$  и  $h$  – ширина и толщина сечения.

С учетом предыдущих формул (1)–(3), величина максимальной относительной деформации определяется в зависимости от перемещения свободного конца стержня:

$$\varepsilon = \frac{3hy}{2l^2}, \quad (4)$$

Известно, что для хрупких материалов прочность на сжатие в несколько раз превышает прочность на растяжение. К таким материалам относятся и плазменные покрытия. Поэтому разрушение покрытия определялось прочностью растянутых, а не сжатых слоев. Влияние неоднородности механических свойств по толщине покрытия оценивалось при сравнении результатов испытаний при растяжении внутренней и внешней поверхности. Разрушающее напряжение определялось по параметрам излома образца.

Испытания отслоенного самофлюсующегося покрытия ПРНХ15СР2 выполняли путем измерения перемещения свободного конца образца под действием приложенной поперечной силы.

Максимальная величина перемещения при разломе образца составила 19,5 мм. Параметры образца: ширина образца  $13,2 \cdot 10^{-3}$  м; толщина образца  $1,46 \cdot 10^{-3}$  м; длина 0,1 м. Материал покрытия ПРНХ15СР2 состоит в основном из 82 % никеля, 15 % хрома, 1 % кремния и 2 % бора. Размеры фракций порошка 40–100 мкм. Величина модуля упругости определялась по формуле (2). Для оценки наибольшего растягивающего напряжения в критическом сечении в точке закрепления образца использовалась формула (3), а величина относитель-

го удлинения поверхностного слоя в этом сечении находилась по формуле (4). Результаты измерений при растяжении внутренней поверхности покрытия приведены в табл. 1. Исходя из полученных результатов, при растяжении внутренней части покрытия, в основном, выполняется закон Гука, который заключается в пропорциональности между напряжением и относительной деформацией, вплоть до момента разрушения. Величина модуля упругости покрытия в среднем составляет  $5,6 \cdot 10^{10}$  Па, что примерно в 4 раза меньше модуля упругости сплошного материала и согласуется с измерениями других авторов [2].

Для оценки отличия свойств по высоте покрытия выполнены аналогичные измерения при растяжении также и на внешней его поверхности.

Результаты измерений характеристик материала на растяжение приведены в таблице 2.

Сравнивая характеристики таблиц 1 и 2, следует отметить, что предел прочности на растяжение и модуль упругости внешней части покрытия примерно на 20 % ниже, чем для внутренней, прилегающей к подложке части покрытия. Указанное отличие объясняется, по-видимому, отличием температурных условий формирования покрытия и возникновением остаточных термических напряжений в нем [6–10]. Нагретые до более высокой температуры внешние слои покрытия при остывании растягиваются сильнее, чем внутренние слои покрытия, что является причиной зарождения микротрещин и снижения механических свойств, таких как предел прочности на растяжение и модуль упругости.

**Таблица 1** – Характеристики деформации изгиба при растяжении внутренней поверхности покрытия

№	P, Н	M, Н·м	y, $10^{-3}$ , м	$\sigma$ , МПа	E, $10^4$ , МПа	$\varepsilon$ , $10^{-3}$
1	1	0,1	2,0	21,3	4,88	0,44
2	2	0,2	3,8	42,6	5,13	0,91
3	3	0,3	5,5	63,9	5,32	1,20
4	4	0,4	7,3	85,3	5,34	1,59
5	5	0,5	9,0	106,6	5,42	1,97
6	6	0,6	10,6	127,9	5,52	2,32
7	7	0,7	12,0	149,3	5,69	2,63
8	8	0,8	13,2	170,6	5,90	2,89
9	9	0,9	15,5	191,9	5,66	3,39
10	10	1,0	17,0	213,2	5,73	3,72
11	11	1,1	19,5	234,5	5,49	4,27

**Таблица 2** – Характеристики деформации изгиба при растяжении внешней поверхности покрытия

№	P, Н	M, Нм	y, $10^{-3}$ , м	$\sigma$ , МПа	E, $10^4$ , МПа	$\varepsilon$ , $10^{-3}$
1	1	0,09	2,0	19,2	3,55	0,54
2	2	0,18	3,5	38,4	4,06	0,95
3	3	0,27	5,0	57,5	4,26	1,35
4	4	0,36	6,0	76,8	4,73	1,62
5	5	0,45	7,5	95,9	4,73	2,03
6	6	0,54	9,0	115,1	4,73	2,43
7	7	0,63	10,8	134,3	4,60	2,91
8	8	0,72	12,5	153,5	4,54	3,38
9	9	0,81	14,0	172,7	4,56	3,88
10	10	0,9	15,5	191,9	4,58	4,19

Несущая способность покрытия  $\sigma_n$  определяет возможность сохранения целостности покрытия под действием внешней нагрузки. Она меньше когезионной прочности  $\sigma_k$  на величину остаточного напряжения

$$\sigma_n = \sigma_k - \sigma_o, \quad (5)$$

где  $\sigma_o$  – величина остаточного напряжения, возникающая при отличии температуры покрытия от температуры подложки в момент осаждения покрытия.

Для определения несущей способности покрытия проводились испытания на изгиб с получением диаграммы растяжения покрытия. Пример расчета такой диаграммы приведен в [5], рис. 3.

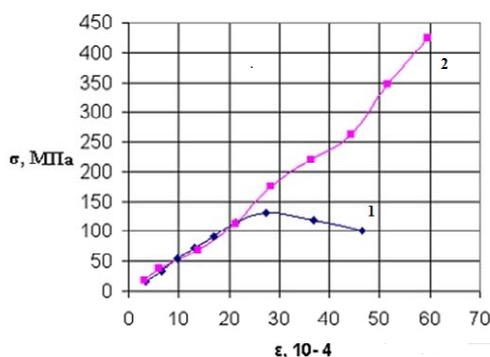


Рис. 3. Зависимость напряжений растяжения и сжатия от относительной деформации на поверхности покрытия: 1 – растяжение; 2 – сжатие

Особенностью диаграммы растяжения является наличие максимума напряжения со значением  $\sigma_n$ , которое соответствует появлению микротрещины и началу разрушения покрытия. Измеренные значения когезионной прочности и несущей способности покрытия были использованы для оценки распределения остаточных напряжений по толщине покрытия.

Распределение остаточных напряжений. Величина несущей способности снижается при возрастании толщины покрытия. При максимальной толщине покрытия  $h_{max} = 1,46$  мм в рассматриваемых условиях происходил разрыв, что соответствовало нулевому значению несущей способности. Причиной снижения несущей способности при возрастании толщины покрытия является линейное возрастание остаточных напряжений по толщине покрытия [11]. Из уравнения баланса напряжений в виде (5) определялось распределение остаточного напряжения и несущей способности материала для разной толщины покрытия, приведенные на рис. 4.

График на рис. 4. построен по измеренным значениям когезионной прочности отслоенного покрытия и несущей способности покрытия толщиной 0,6 и 0,8 мм, сцепленного с подложкой. Численные значения указанных величин показаны в табл. 3.

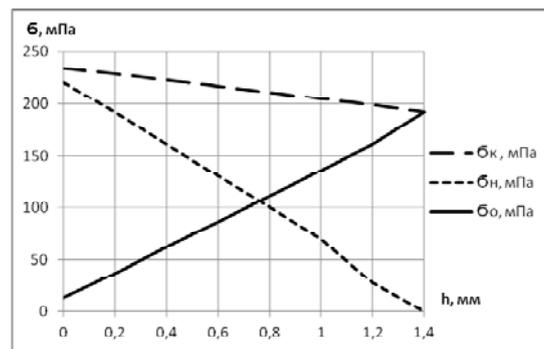


Рис. 4. Распределение когезионной прочности  $\sigma_k$ , несущей способности  $\sigma_n$  и остаточного напряжения  $\sigma_o$  в слое покрытия

Таблица 3 – Изменение когезионной прочности, несущей способности и остаточного напряжения и в зависимости от толщины покрытия

$h$ , мм	$\sigma_k$ , МПа	$\sigma_n$ , МПа	$\sigma_o$ , МПа
0	234,5	221	13,5
0,2	229	192	37
0,4	223	161	62
0,6	217	131	86
0,8	211	100	111
1,0	205	69	136
1,2	199	28	161
1,46	191,9	0	191,9

При уменьшении толщины покрытия происходит возрастание несущей способности, которое удается аппроксимировать линейной зависимостью типа

$$\sigma_n = \sigma_{n0} \left( 1 - \frac{h}{h_{max}} \right), \quad (6)$$

Величина несущей способности первого слоя покрытия  $\sigma_{n0}$  находится путем аппроксимации по формуле  $\sigma_{n0} = -h \cdot d\sigma_n/dh$  по результатам измерений прочности покрытия на подложке. Поскольку согласно [6] при толщине покрытия  $h = 0,6$  мм несущая способность  $\sigma_n = 131$  МПа, а при  $h = 1,46$  мм она равна нулю  $\sigma_n = 0$ , то градиент несущей способности определится  $d/dh \approx -152$  МПа/мм. При этом несущая способность первого слоя покрытия составит  $\approx 1,46 \cdot 152 \approx 221$  МПа.

Когезионная прочность по результатам испытаний отслоенного покрытия согласно табл. 1 и 2 определится при  $h_{max} = 1,46$  мм

$$\sigma_k = \sigma_{k0} \left( 1 - 0,182 \frac{h}{h_{max}} \right), \quad (7)$$

где  $\sigma_{k0} = 234,5$  МПа – когезионная прочность на поверхности внутренней стороны покрытия, табл. 1.

Величина остаточных напряжений согласно (5)–(7) определится:

$$\sigma_0 = \sigma_k - \sigma_n = 13,5 + 188,4 \frac{h}{h_{\max}}. \quad (8)$$

Согласно (8), остаточное напряжение возрастает при увеличении толщины покрытия. Минимальное остаточное напряжение, равное разности когезионной прочности и несущей способности при  $h = 0$ , составит  $\sigma_{0\min} = \sigma_{k0} - \sigma_{n0} = 13,5$  МПа. Причиной возникновения остаточного напряжения в первом слое является нагрев подложки струей плазмы и потоком осаждающихся частиц. Максимальное остаточное напряжение равно когезионной прочности при максимальной толщине покрытия и составляет, согласно табл. 2,  $\sigma_{0\max} = 191,9$  МПа. Возрастание остаточных напряжений при увеличении толщины покрытия связано с нагревом покрытия при осаждении частиц на его поверхность. В зоне контакта покрытия с подложкой разность температур и остаточные термические напряжения будут меньше за счет охлаждающего влияния подложки.

#### Выводы

1. В результате испытаний на изгиб отслоенного от подложки покрытия ПРНХ15СР2 получены значения модуля упругости и когезионной прочности напыленного материала при растяжении как с внешней, так и с внутренней, прилегающей к подложке стороны. Обнаружено, что предел прочности и модуль упругости на внутренней поверхности покрытия превышает на 18 % соответствующее значение на внешней поверхности покрытия.

2. Показано, что несущая способность покрытия, сцепленного с подложкой, меньше когезионной прочности на величину остаточного термического напряжения. Получено распределение остаточного напряжения по толщине покрытия и остаточное напряжение в первом слое. Неравномерность распределения остаточного напряжения по толщине связана с возрастанием температуры подложки при осаждении покрытия.

#### Список литературы

1. Нанесения покрытия / В. М. Корж, В. Д. Кузнецов, Ю. С., Борисов К. А. Ющенко. – К. : Аристей, 2005. – 204 с.
2. Кудинов В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / Кудинов В. В., Бобров Г. В. – М. : Metallurgiya, 1992. – 432 с.
3. Балдаев Л. Х. Современные тенденции получения газотермических покрытий / Балдаев Л. Х., Калита В. И. // Технология металлов. – 2003. – № 2. – С. 17–20.
4. Проблемы порошкового материаловедения. Часть VI. Плазменно-лазерные покрытия / Шмаков А. Н., Анциферов В. Н., Буланов В. Я., Ханов А. М. – Екатеринбург. – 2006. – 588 с.
5. Напряжение и деформация плазменного покрытия при изгибе полочки / Е. А. Зеленина, С. В. Лоскутов, А. В. Ершов, С. Н. Машок // Вісник двигунобудування. – 2017. – № 1. – С. 39–42.
6. Возникновение и перераспределение внутренних напряжений в электродуговых покрытиях во время их формирования / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгунук и др. // Автомат. сварка. – 2006. – № 10. – С. 15–19.
7. Дерябкина Е. С. Влияние щеточной обработки на уровень остаточных напряжений в газоплазменных покрытиях / Е. С. Дерябкина // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии 2013. – № 59. – С. 178–185.
8. Методы оценки служебных свойств защитных покрытий / Л. Х. Балдаев, И. Ф. Арутюнова, Н. А. Волосов [и др.] // Сварочное производство. – 2001. – № 9. – С. 35–38.
9. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий / Барвинок В. А. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
10. Теплофизическая модель и расчет остаточных напряжений в газотермических покрытиях / А. Ф. Пузряков, В. А. Тарасов, Н. Ю. Липин [и др.] // Технология машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 39–44.
11. Определение разрушающих термонапряжений цилиндрического плазменного покрытия / Е. А. Зеленина, С. В. Лоскутов, А. В. Ершов, В. Г. Шевченко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2017. – № 2. – С. 90–93.

Одержано 23.01.2019

#### Ершов А. В., Лоскутов С. В., Зеленина О. А. Оцінка розподілу залишкових механічних напруг у плазмових покриттях

**Мета роботи.** Підвищення працездатності плазмових покриттів шляхом пошуку умов зниження залишкових напружень. Для досягнення мети виконано розроблено метод визначення залишкових напружень залежно від характеристик міцності і товщини покриття.

**Методи дослідження.** Вимірювання механічних властивостей покриттів при випробуванні на вигин. Аналіз результатів вимірювань міцності покриттів.

**Отримані результати.** Запропоновано метод визначення залишкових напружень шляхом використання результатів вимірювань механічних характеристик плазмового покриття. Досліджено механічні характеристики порошкового хромонікелевого покриття при випробуванні на вигин. Виявлено відмінність когезійної міцності зовнішніх і внутрішніх шарів покриття. Для розрахунку залишкових напружень використовувалися отримані значення когезійної міцності відшарованого покриття і несучої здатності покриття зчепленого з підкладкою. Показано, що для покриття зчепленого з підкладкою, несуча здатність

мени за когезійну міцність. Обґрунтовано припущення про те, що залишкове напруження визначається різницею між когезійною міцністю і несучою здатністю покриття. Знайдено розподіл залишкових напружень по товщині плазмового покриття і величину залишкового напруження в зоні контакту з підкладкою.

**Наукова новизна.** Показано, що когезійна міцність перевищує міцність покриття, зчепленого з підкладкою, на величину залишкового напруження. Знайдено розподіл залишкового напруження та несучої здатності від зміни товщини покриття.

**Практична цінність.** Отримані результати вимірювань когезійної міцності і залишкового напруження дозволяють обґрунтувати надійність застосування плазмових покриттів і аналізувати дані вимірювань міцності з метою визначення працездатності деталей.

**Ключові слова:** плазмове покриття, механічне напруження, когезійна міцність, остаточне напруження, градієнт, відносна деформація, модуль пружності, несуча здатність.

**Yershov A., Loskutov S., Zelenina E. Assessment of the distribution of residual mechanical stresses in plasma coatings**

**Purpose.** To improve the performance of plasma coatings by searching for conditions for reducing the residual stresses. To achieve the goal, a method has been developed for determining residual stresses depending on the strength characteristics and the coating thickness.

**Research methods.** Measurements of the mechanical properties of coatings during bending testing. Analysis of the measurement results of coatings strength.

**Results.** A method is proposed for determining residual stresses by using the results of measurements of the mechanical characteristics of a plasma coating. The mechanical characteristics of the chromium-nickel powder coating during bending tests are investigated. A difference in the cohesive strength of the outer and inner layers of the coating was found. To calculate the residual stresses, we used the obtained values of the cohesive strength of the peeled coating and the bearing capacity of the coating adhered to the substrate. It is shown that for coating adhered to the substrate, the bearing capacity is less than the cohesive strength. The assumption that the residual stresses is determined by the difference between the cohesive strength and the bearing capacity of the coating is substantiated. The distribution of residual stresses across the plasma coating thickness and the residual stresses in the zone of contact with the substrate are found.

**Scientific novelty.** It is shown that the cohesive strength exceeds the strength of the coating adhered to the substrate by the amount of residual stress. The distribution of residual stress and bearing capacity from changing coating thickness is found.

**Practical value.** The results of measurements of cohesive strength and residual voltage make it possible to justify the reliability of the use of plasma coatings and analyze the data of strength measurements in order to determine the performance of parts.

**Key words:** plasma coating, mechanical stress, cohesive strength, residual stress, gradient, relative deformation, elastic modulus, load bearing capacity.

---