

УДК 621.793.7: 533.924

Д-р техн. наук Ершов А. В., Зеленина Е. А.

Национальный университет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

## РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ И ПОДЛОЖКИ МЕТОДОМ ВНЕЦЕНТРЕННОГО СЖАТИЯ

**Цель работы** состоит в повышении работоспособности плазменных покрытий путем разработки методов измерений и поиска условий снижения остаточных напряжений. Выполнена разработка метода определения остаточных напряжений в зависимости от изгиба основы после нанесения покрытия.

**Методы исследования.** Разработка модели внецентренного сжатия образца под влиянием силы, действующей в покрытии. Выполнены измерения прогибов основы, которые были использованы для расчета остаточных напряжений плазменных покрытий.

**Полученные результаты.** Предложен метод определения остаточных напряжений плазменного покрытия путем использования результатов измерений прогиба образца после нанесения порошкового хромоникелевого покрытия. Выполнены измерения, показывающие параболическую зависимость величины прогиба основы по длине образца, которые подтверждают постоянство изгибающего момента, обусловленного действием силы остаточного напряжения в соответствии с разработанной расчетной моделью. Выполнены расчеты остаточных напряжений в покрытии в зависимости от измеренных значений деформации образцов. Проведены сопоставления найденных остаточных напряжений с результатами исследований, полученными другим методом, который основан на определении разности между прочностью и несущей способностью покрытия.

**Научная новизна.** Показано, что остаточное напряжение в покрытии и основе можно определить по величине деформации изгиба образца после нанесения плазменного покрытия. Обнаружено, что величина остаточного напряжения в основе может превосходить остаточное напряжение в покрытии. Установлено, что деформация изгиба основы имеет параболическую зависимость по длине образца, что подтверждает постоянство изгибающего момента, обусловленного действием силы внецентренного сжатия.

**Практическая ценность.** Полученные результаты измерений остаточного напряжения при сопоставлении их с прочностью покрытия позволяют обосновать надежность применения плазменных покрытий и использовать результаты 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

Нанесение плазменного покрытия сопровождается сложными термомеханическими процессами [1–5]. К ним относится и возникновение градиентов температуры в рабочей зоне, что приводит к появлению остаточных температурных напряжений в покрытии и основе [6–12]. Важность проблемы определения остаточных напряжений связана с обеспечением гарантированной прочности и работоспособности плазменных покрытий. Совершенствование методики расчета напряженного состояния покрытий является актуальной научной проблемой. Один из способов решения проблемы состоит в разработке методики определения остаточных напряжений в зависимости от деформации основы после нанесения покрытия.

### Анализ исследований и публикаций

В опубликованных работах имеются примеры расчета напряженно деформированного состояния основы

под действием остаточных напряжений в плазменном покрытии. Однако существуют отличия в постановке условий расчетов. Оценки остаточных напряжений в покрытиях из углеродистых сталей [6] показывают, что существенное влияние на распределение остаточных напряжений оказывает мартенситное превращение и связанное с ним изменение объема покрытия. Иная картина распределения остаточных напряжений наблюдается в покрытиях из хромоникелевых сталей, которые отличаются отсутствием температурных фазовых переходов. В этом случае остаточные напряжения зависят от распределения температуры основы в процессе осаждения покрытия. Так, в [7] получено линейно возрастающее распределение растягивающего остаточного напряжения по толщине покрытия. При этом в приповерхностных слоях основы напряжения оказываются сжимающими.

В работах [8–10] рассмотрены общие, сравнительно громоздкие подходы к решению задачи по опреде-

лению остаточных напряжений. Оригинальный деформационный метод, основанный на изменении кривизны покрытия после отслоения его от основы, рассмотрен в работе [11]. В результате, как и в [7], было показано возрастание остаточного напряжения по толщине хромоникелевого покрытия.

Прочностный метод расчета остаточного напряжения, заключающийся в измерении разности прочности отслоенного покрытия и покрытия, сцепленного с основой, был использован в [12]. В результате показано, что, как в [7] так и [11], происходит возрастание остаточного напряжения по толщине покрытия. Кроме того обнаружено, что в граничащем с основой слое покрытия имеется относительно небольшое остаточное напряжение 13,5 МПа. Однако в расчетных оценках его величиной иногда можно пренебречь.

Расчет влияния нагрева на термические напряжения в плазменном покрытии рассмотрен в [13]. Изгиб основы происходил под действием термоупругой силы, действующей в покрытии. Данный подход может быть использован для получения формул связи между остаточным напряжением и деформацией основы.

**Целью работы** является разработка инженерного метода определения остаточного напряжения в покрытии и основе по результатам измерений деформации образцов.

### Теоретическая модель расчета

Температура плазменного покрытия в процессе его формирования значительно превосходит температуру подложки, что приводит к значительным температурным деформациям и возникновению остаточных напряжений в нем, которые изгибают основу. Задачей расчета является установление зависимости между образовавшейся кривизной образца и напряжениями в покрытии и основе. Для решения задачи используется модель внецентренного сжатия основы под действием результирующей силы, действующей в покрытии:

$$F = b \int_0^h \sigma dy, \quad (1)$$

где  $F$  – результирующая сила растяжения покрытия и внецентренного сжатия основы;  $b$  – ширина прямоугольного образца;  $\sigma$  – остаточное напряжение в покрытии;  $y$  – поперечная координата покрытия, отсчитываемая от центра основы;  $h$  – его толщина. Плечо действия силы относительно центра сечения основы равно сумме половины толщины основы и координаты приложения результирующей силы сжатия. Момент результирующей силы сжатия образца относительно центральной оси основы определится формулой:

$$M = \int_{\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}+h} \sigma y dy, \quad (2)$$

где  $H$  – толщина основы.

Дифференциальное уравнение упругой линии изгиба основы имеет вид:

$$\frac{d^2 Y}{dx^2} = \frac{M}{EI}, \quad (3)$$

где  $Y$  – координата поперечной деформации (прогиба) основы;  $x$  – продольная координата;

$E$  – модуль упругости основы,  $I$  – момент инерции основы,  $I = bH^3/12$ . Величину прогиба основы, как отклонение от начальной прямолинейности, можно определить двойным интегрированием (3) при следующих граничных условиях:

$$x = 0: \quad Y = 0; \quad \frac{dY}{dx} = 0, \quad x = L: \quad Y = Y_m, \quad (4)$$

где  $L$  – длина подложки,  $Y_m$  – максимальный прогиб подложки под действием момента силы внецентренного сжатия подложки, который определится после интегрирования (3) в виде:

$$Y_m = \frac{M L^2}{EI} \cdot \frac{1}{2}. \quad (5)$$

Формула (5) дает возможность определить изгибающий момент силы внецентренного сжатия, которая сформирована действием остаточного напряжения. Как показано в [7, 11, 12], остаточное напряжение в хромоникелевых покрытиях можно принять линейно возрастающим по толщине:

$$\sigma = \frac{\sigma_m y}{h}, \quad (6)$$

где  $\sigma_m$  – максимальное напряжение на поверхности покрытия. Здесь пренебрегается величиной остаточного напряжения в покрытии на поверхности основы ввиду его малости.

Тогда сила и момент внецентренного сжатия подложки определяются согласно (1) и (2) в зависимости от максимального остаточного напряжения в виде:

$$F = \frac{\sigma_m b h}{2}, \quad (7)$$

$$M = F \left( \frac{H}{2} + \frac{2h}{3} \right) = \frac{\sigma_m b h}{2} \left( \frac{H}{2} + \frac{2h}{3} \right). \quad (8)$$

Совместное решение (5) и (8) определяет максимальное остаточное напряжение в зависимости от прогиба подложки:

$$\sigma_m = \frac{4EIY_m}{L^2 b h \left( \frac{H}{2} + \frac{2h}{3} \right)}. \quad (9)$$

Максимальное изгибающее напряжение в основе определится по формуле:

$$\sigma_u = \frac{6M}{bH^2} = \frac{3\sigma_m h}{H^2} \left( \frac{H}{2} + \frac{2h}{3} \right). \quad (10)$$

Напряжение сжатия в основе:

$$\sigma_c = \frac{F}{bH} = \frac{\sigma_m h}{2H}. \quad (11)$$

Максимальное остаточное напряжение в основе расположено в точке контакта с покрытием и определяется суммой (10) и (11). Из (9) видно, что для вычисления максимального остаточного напряжения в покрытии следует измерить максимальный прогиб образца и определить модуль упругости основы. Для этого выполнялись измерения деформации образца основы без покрытия по схеме консольный изгиб [14].

Теоретически величина перемещения свободного конца образца основы под действием поперечной силы  $P$  при консольном изгибе определяется формулой:

$$Y = \frac{PL^3}{3EI}. \quad (12)$$

где  $P$ ,  $L$  – длина образца,  $EI$  – жесткость сечения,  $E$  – модуль упругости,  $I$  – момент инерции поперечного сечения.

Использование формулы (12) определяет величину модуля упругости основы в зависимости от перемещения свободного конца:

$$E = \frac{PL^3}{3YI}. \quad (13)$$

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

$$\sigma = \frac{PL}{W}. \quad (14)$$

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

Величина относительной деформации определялась исходя из закона Гука:

$$\varepsilon = \sigma / E. \quad (15)$$

Следует отметить, что предложенный метод расчета не учитывает наличие поверхностных остаточных напряжений в основе покрытия.

### Измерение прогиба и результаты расчета остаточных напряжений в покрытии

Целью экспериментов по определению модуля упругости основы было измерение перемещений стержня под действием поперечной изгибающей силы. Для измерений использовались стандартные образцы из холоднокатаной стали Ст. 3 шириной  $b = 12,3$  мм, толщиной  $H = 1,5$  мм и длиной  $L = 46$  мм. При измерении перемещений использовался индикатор перемещений с ценой деления 0,01 мм. Величина изгибающей силы определялась подбором грузов. Результаты измерения изгибной деформации пластины и расчета механических характеристик холоднокатаной стали приведены в табл. 1. Погрешность измерений  $E$  составляет 6 % при доверительной вероятности  $\alpha = 0,9$ .

В справочнике по механическим свойствам металлов принято, что модуль упругости равен  $2,0 \cdot 10^{11}$  Па, а

предел текучести составляет 250–290 МПа, [15]. Измеренные значения модуля упругости оказались на 12–20 % ниже, чем в [15]. Причиной указанного отличия, возможно, являются остаточные напряжения в поверхностных слоях образца, которые образуются при прокатке листовой низкоуглеродистой стали.

**Таблица 1** – Характеристики деформации при изгибе пластины [13]

$P$ , Н	$y$ , $10^{-3}$ м	$\sigma$ , МПа	$E$ , $10^5$ МПа	$\varepsilon$ , $10^{-4}$
5,85	0,30	59,3	1,86	3,18
11,25	0,62	114	1,74	6,58
16,78	0,95	171	1,69	10,1
22,22	1,34	226	1,59	14,2
27,63	1,82	281	1,45	19,4
33,47	2,33	340	1,37	24,9
44,17	2,94	394	1,26	31,3

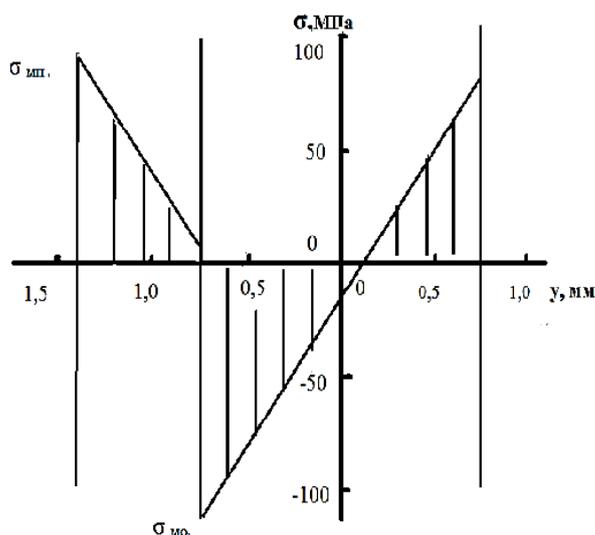
При нанесении покрытия на массивную основу температура поверхности обычно не превышает 200 °С, что еще не приводит к появлению температурных пластических деформаций в поверхностных слоях основы. Однако, при неравномерном нагреве основы до температуры 300 °С, в поверхностном слое происходит пластическая деформация, приводящая к искривлению образца при охлаждении, даже при отсутствии покрытия. Поэтому при отборе образцов для измерения прогибов особое внимание обращалось на отсутствие перегрева образца вследствие недостаточного теплового контакта с охлаждающим медным основанием в процессе нанесения покрытия. Причиной недостаточного теплового контакта являлось наличие окалины на поверхности медного основания. Внешние признаки перегрева заключались в появлении синего цвета и значительном искривлении образца.

Величина прогиба определялась как отклонение от прямолинейности образца. Один конец образца вместе с плоской пластиной помещался в зажим. При этом пластина располагалась сверху. На пластине устанавливался индикатор часового типа на плоской скользящей платформе, при перемещении которого можно было измерить распределение прогиба по длине образца [12]. Результаты измерений распределения прогибов по длине 3-х образцов и их средние значения  $Y_{cp}$  приведены в табл. 2.

В нижней строке табл. 2. приведен расчет параболической зависимости прогиба от длины образца, которая согласуется с результатами измерений. Приведены результаты расчетов максимального остаточного напряжения в хромоникелевом покрытии ПРНХ15СР2 с использованием формулы (9) при длине образца 45 мм, толщине основы 1,5 мм, толщине покрытия 0,65 мм. Для расчетов использовалось предварительно измеренное среднее значение модуля упругости основы из стали Ст. 3  $E = 1,8 \cdot 10^{11}$  Па, табл. 1. Полученные значения максимальных остаточных напряжений в покрытии и основе приведены в последних колонках табл. 2. Эпюры распределения напряжений в покрытии и основе показаны на рис. 1.

**Таблица 2** – Распределение прогиба по длине образцов и расчетные значения максимального остаточного напряжения в покрытии и основе

№ образца	$x, 10^{-2}, \text{м}$	1	2	3	4	4,5	Максимальное напряжение в покрытии $\sigma_{\text{мп}}, \text{Па}$	Максимальное напряжение в основе $\sigma_{\text{мо}}, \text{МПа}$
1	$Y, 10^{-5}, \text{м}$	4	14	29	52	70	89,5	-111
2	$Y, 10^{-5}, \text{м}$	4	16	32	55	71	90,8	-113
3	$Y, 10^{-5}, \text{м}$	4	15	34	53	68	87,2	-108
	$Y_{\text{ср}}$	4	15	31,7	53,3	69,7		
	$Y = kL^2$	3,4	13,9	31	54,5	70		



**Рис. 1.** Эпюры распределения напряжений в покрытии ПРНХ15СР2 и основе

Начало координат на рис. 1 расположено в центре основы, а плазменное покрытие находится слева. Величина максимального напряжения в покрытии, определенная по кривизне образца, составляет в среднем 90 МПа и удовлетворительно согласуется с оценкой остаточного напряжения в работе [12, рис. 4], которая составила 85 МПа и определялась как разность между прочностью и несущей способностью покрытия, сцепленного с основой. В покрытиях, полученных в аналогичных условиях [16], однако при меньшем токе дуги плазматрона (не 450 А, как в рассмотренном примере, а в интервале от 116 до 160 А), остаточные напряжения оказались меньшими и равными 19 МПа. В результате исследований в [16] получена математическая модель на базе уравнения регрессии, которая показывает возрастание остаточного напряжения с увеличением тока дуги плазматрона. Однако в [16] отсутствуют данные о распределении остаточного напряжения по толщине покрытия.

Напряжения в поверхностном слое основы определялись по формулам (10)–(11). При заданных соотношениях размеров покрытия и основы максимальное напряжение сжатия в поверхностном слое основы на границе с покрытием составляет в среднем  $\sigma_{\text{мо}} = -110$  МПа, табл. 2, а максимальное напряжение растяжения на противоположной поверхности основы меньше на напряжение осевого сжатия и составляет примерно 90 МПа.

## Выводы

1. Разработана инженерная методика расчета остаточного напряжения покрытия, которая позволяет по измерению прогиба образца определить напряжение в покрытии.
2. Экспериментально и теоретически показано, что распределение прогиба по длине образца имеет параболическую зависимость. Получено удовлетворительное согласие расчетных значений остаточного напряжения в покрытии с экспериментальными результатами, определенными по другой расчетной модели.
3. Найдено, что напряжение сжатия в поверхностном слое основы толщиной 1,5 мм по абсолютной величине превосходит наибольшее напряжение растяжения в покрытии.
4. Обнаружено, что наличие поверхностных остаточных напряжений, образованных при прокатке листовой стали Ст. 3, приводит к уменьшению расчетного модуля упругости и снижению сопротивляемости изгибу на (12–20) %.

## 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. : Металлургия, 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 подложки / Е. А. Зеленина, С. В. Лоскутов, А. В. Ершов, С. Н. Мацок // 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. Студенти др. // Автомат. сварка. – 2006. – № 10. – С. 15–19.
7. Дерябкина Е. С. Влияние щеточной обработки на уровень остаточных напряжений в газопламенных покрытиях / 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.
12. Ершов А. В. Оценка распределения остаточных механических напряжений в плазменных покрытиях / А. В. Ершов, Е. А. Зеленина // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2018. – № 2. – С. 56–59.
13. Астапов А. Н. Расчет НДС в многослойной системе «Подложка-функциональное покрытие» при тепловом нагружении / А. Н. Астапов, С. И. Жаворонок // Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций // DFCMS-2016, ИМАШ РАН, Москва, Россия 18–20 октября 2016 г.
14. Зеленина О. А. Пружні властивості холоднодеформованої сталі при випробуванні на вигін / О. А. Зеленина, А. В. Ершов, С. В. Лоскутов // Тиждень науки : збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції ЗНТУ. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. – С. 402–403.
15. Уваров В. В. Структура и свойства листовых сталей для холодной штамповки : Учебное пособие / В. В. Уваров, Е. А. Носова / Под общ. ред. Гречникова Ф. В. // Самарский гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2003. – 74 с.
16. Оценка уровня остаточных напряжений в плазменных покрытиях / Зверев Е. А., Скиба В. Ю., Вахрушев Н. В., Гаврилов А. К. // Международный научно-исследовательский журнал 2017, Выпуск № 5(59). – Часть 3. – Май 2017. – Технические науки. – С. 42–47.

Одержано 09.12.2019

### Ершов А. В., Зеленина О. А. Розрахунок напруженого стану плазмового покриття і підкладки методом відцентрового стиснення

*Мета роботи* полягає в підвищенні працездатності плазмових покриттів шляхом розробки методів вимірювань і пошуку умов зниження залишкових напружень. Виконано розробку методу визначення залишкових напружень в залежності від вигину основи після нанесення покриття.

*Методи дослідження.* Розробка моделі позацентрального стиснення зразка під впливом сили остаточного напруження у покритті. Вимірювання прогинів основи та використання їх для розрахунку залишкових напружень плазмових покриттів.

*Отримані результати.* Запропоновано метод визначення залишкових напружень плазмового покриття шляхом використання результатів вимірювань прогину основи після нанесення порошкового хромонікелевого покриття. Виконані вимірювання, що показують параболічну залежність величини прогину основи по довжині зразка, які підтверджують сталість згинального моменту, обумовленого дією сил залишкового напруження відповідно до розробленої розрахункової моделі. Виконано розрахунки залишкових напружень в покритті залежно від вимірних значень деформації зразків. Проведено зіставлення знайдених залишкових напружень з результатами досліджень, отриманих іншим методом, заснованим на визначенні різниці між міцністю і несучою здатністю покриття.

*Наукова новизна.* Показано, що залишкову напругу в покритті і основі можна визначити за величиною деформації вигину зразка після нанесення плазмового покриття. Виявлено, що величина залишкового напруження в основі може перевершувати залишкову напругу в покритті. Встановлено, що деформація вигину основи має параболічну залежність по довжині зразка, що підтверджує сталість згинального моменту, обумовленого дією сили позацентрального стиснення.

*Практична цінність.* Отримані результати вимірювань залишкового напруження при зіставленні їх з міцністю покриття дозволяють обґрунтувати надійність застосування плазмових покриттів і використовувати результати вимірювань міцності з метою визначення працездатності деталей.

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

**Ershov A., Zelenina E. Calculation of the stressed state of plasma coating and substrates by excentral compression method**

**The purpose** The purpose of the work is to increase the performance of plasma coatings by developing measurement methods and finding conditions for reducing residual stresses. The development of a method for determining residual stresses depending on the bending of the base after coating.

**Research methods.** Development of a model of eccentric compression of a sample under the influence of the force acting in the coating. Measurement of substrate deflections and their use for calculating the residual stresses of plasma coatings.

**Results.** A method is proposed for determining the residual stresses of a plasma coating by using the results of measurements of the deflection of the base after applying a powder chromium-nickel coating. Measurements were made showing the parabolic dependence of the magnitude of the deflection of the base along the length of the sample, which confirm the constancy of the bending moment due to the action of the forces of the residual stress in accordance with the developed calculation model. The residual stresses in the coating are calculated depending on the measured values of the deformation of the samples. The found residual stresses are compared with the results of studies obtained by another method based on determining the difference between the strength and bearing capacity of the coating.

**Scientific novelty.** It is shown that the residual stress in the coating and base can be determined by the magnitude of the bending strain of the sample after applying the plasma coating. It has been found that the amount of residual stress in the substrate can exceed the residual stress in the coating. It was established that the bending strain of the base has a parabolic dependence along the length of the sample, which confirms the constancy of the bending moment due to the action of the eccentric compression force.

**Practical value.** The results of measurements of the residual stress when comparing them with the strength of the coating allow us to justify the reliability of the use of plasma coatings and use the results of strength measurements to determine the health of parts.

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

---