

В. А. ЛЕБЕДЕВ¹, С. А. ЛОЙ², Г. В. ЕРМОЛАЕВ², М. В. МАТВИЕНКО²

¹ Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

² Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ С НАПЫЛЕННЫМ СЛОЕМ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗГИБ

Предметом изучения является напряженное состояние при изгибе, как в упругой, так и упруго-пластической стадии, плоского образца с напыленным слоем, имеющем иные механические свойства (модуль упругости и предел текучести), чем материал подложки. *Целью* является выбор вариантов покрытий малой (мягкий слой), нейтральной и большой (жесткий слой) жесткости по отношению к основному металлу, имеющему меньший предел текучести, при разных соотношениях их толщин (0,2, 0,4 и 0,6). *Задачи*: выполнить анализ распределения нормальных напряжений, определить наиболее нагруженные точки на поверхности напыленного слоя и на нижней поверхности подложки, определить условия и причины появления трещин в напыленном слое и пластических деформаций в подложке.

Используемыми методами являются компьютерное моделирование и аналитические расчеты. Получены следующие *результаты*. Характер распределения напряжений существенно зависит от соотношения толщин напыленного слоя и подложки и не изменяется при пропорциональном их увеличении или уменьшении. Наиболее нагруженными точками в сечении, где нормальные напряжения достигают максимальных значений, являются точки на поверхности напыленного слоя и на нижней поверхности подложки. Максимальные нормальные напряжения как в напыленном слое, так и подложке, значительно (на 2 порядка) превышают касательные. Таким образом, именно они являются основной причиной появления трещин в напыленном слое и пластических деформаций в подложке. При этом результаты расчетов по аналитическим формулам, основанным на законах механики твердого тела, и полученные компьютерным моделированием совпадают, что подтверждает адекватность моделирования. На уровень напряжений при неизменной толщине подложки влияет как относительная толщина напыленного слоя, так и его жесткость. Максимальные напряжения в напыленном слое снижаются с увеличением его относительной толщины и увеличиваются с ростом его относительной жесткости. *Выводы*. Полученные различными методами теоретических исследований результаты позволяют определить направления совершенствования оборудования, технологических приёмов выбора режимов, активных материалов для получения напыленных слоёв с высоким качеством для узлов и деталей различных конфигураций и различных материалов изделий и напыляемых материалов. Результаты работы могут быть использованы на практике при разработке технологических карт ведения процессов напыления. *Научная новизна* полученных результатов состоит следующем: усовершенствованы методы изучения напряженного состояния плоских образцов с напыленным слоем при испытаниях на изгиб; впервые получены результаты влияния комплекса условий напыления на прочностные характеристики напыленного слоя.

Ключевые слова: напыленный слой; испытания на изгиб; напряженное состояние; упругое и упруго-пластическое нагружение.

Постановка проблемы

Для повышения работоспособности и долговечности деталей газовых турбин (в авиадвигателестроении, энергомашиностроении) широко используются специальные защитные покрытия [1-3]. Эти покрытия должны обладать достаточной пластичностью и прочностью и не растрескиваться под действием механических и термических нагрузок. На разрушение покрытия большое влияние оказывают термические напряжения, возникающие при изменении температуры в результате разности ко-

эффициентов линейного температурного расширения подложки и напыленного слоя, так и напряжения при изгибе, возникающие в процессе изготовления и работы детали [4-6].

Анализ последних публикаций

В публикациях, посвященных напряженному состоянию в газотермических покрытиях [7-9], как правило, рассматривается влияние технологических факторов на величину и характер распределения остаточных напряжений и практически отсутствуют

данные об их уровне и распределении в образцах при силовом нагружении [10-12]. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов при испытании на термостойкость и на отрыв рассмотрены в работах [13-15]. Вместе с тем мало изучено НДС образцов с напыленным слоем при наиболее простом методе испытаний на изгиб, что затрудняет сравнение и обобщение результатов экспериментов, проводимых на образцах из различных материалов подложек и покрытий. Поэтому данная работа, посвященная изучению напряженного состояния при изгибе образцов, **актуальна**.

Цель работы

Целью работы является исследование напряженного состояния при изгибе образцов с напыленными покрытиями и установление количественных зависимостей уровня напряжений от соотношения толщин и свойств материалов покрытия и подложки, как в упругой, так и пластической стадии нагружения подложки (основного металла).

Исследования и их результаты

Исследования выполнялись аналитическими расчетами (упругая стадия нагружения) и путем компьютерного моделирования на базе метода конечных элементов использованием программного комплекса ANSYS (упругое и упруго-пластическое нагружение). Изучалось НДС образцов типа плоской пластины (полосы) с нанесенным на верхнюю поверхность покрытием, которые часто используются при испытаниях [16, 17]. Анализировались поля и эпюры напряжений в упругой и пластической стадиях работы на образцах с покрытием при нагружении изгибом сосредоточенной силой. Физические и конечно - элементные (КЭ) модели показаны на рис. 1.

Соответственно, рассматривалось два варианта деформирования: вариант упругий, в котором материалы подложки и напыленного слоя деформируются упруго, и вариант упруго-пластический, в котором в подложке появляются пластические деформации при достижении напряжениями предела текучести.

Длина и ширина физической модели во всех вариантах оставались постоянными, равными $l=100$ мм и $b=20$ мм. Толщины подложки a_2 принимались 1 мм и 2 мм, при этом толщина напыленного слоя a_1 изменялась в пределах 0,2, 0,4 и 0,6 мм и 0,4, 0,8 и 1,2 мм, так, чтобы относительная толщина a_1/a_2 в обоих вариантах толщин подложки оставалась постоянной, равной 0,2, 0,4 и 0,6.

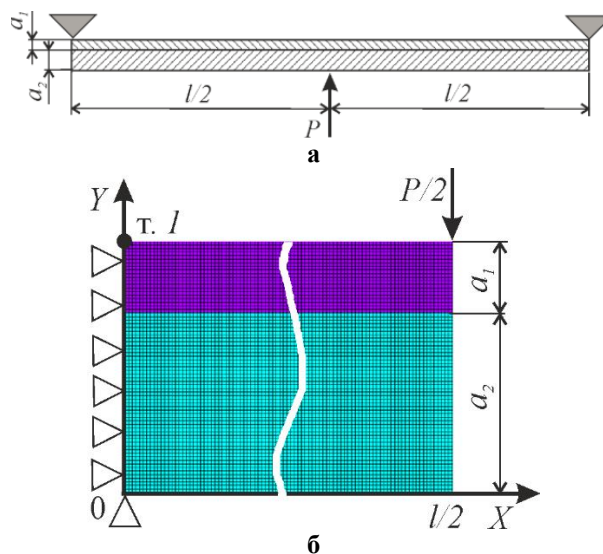


Рис. 1. Схемы физической (а) и КЭ (б) моделей образца с покрытием

С применением методов математического и компьютерного моделирования [18] изучались три варианта покрытий: малой (мягкий слой), нейтральной и большой (жесткий слой) жесткости по отношению к основному металлу. Во всех вариантах упруго-пластической задачи прочность (предел текучести) материала покрытия (650 МПа) принималась больше, чем у материала подложки (300 МПа), чтобы пластические деформации развивались только в подложке. Коэффициент Пуассона для всех материалов подложек и покрытий принимался равным 0,3.

Принятые при моделировании толщины и физико-механические свойства покрытия и подложки приведены в таблице 1.

Таблица 1
Толщины слоев и свойства материалов

Слой	Толщина слоя, мм a_i	Модуль упругости материала покрытия, МПа E_i		
		Мягкое	Нейтральное	Жесткое
подложка	1,0 и 2,0 мм	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
покрытие	от 0,4 до 1,2 мм	$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$

Для оценки адекватности результаты компьютерного моделирования напряжений в образцах с покрытием в упругой задаче сравнивались с аналитическим решением для двухслойной пластины по методике, изложенной в [19]. Методика основывается на гипотезе плоских сечений и позволяет определить продольные и касательные напряжения на

большей части образца, где выполняется гипотеза плоских сечений, при упругом деформировании материалов. Для определения напряжений в любой точке сечения образца под действием изгибающего момента M и перерезывающей силы Q в сечении использовались следующие зависимости.

Нормальные напряжения в любой точке сечения на расстоянии y_i от оси сравнения, расположенной на нижней кромке образца:

$$\sigma_x = \frac{M(y_0 - y_i)E_i}{E_0 I_{x0}}.$$

Касательные напряжения в любой точке напыленного слоя

$$\tau_{xy} = \frac{QE_1(a_1 + a_2 - y_i)\left(\frac{a_1 + a_2 + y_i}{2} - y_0\right)}{E_0 I_{x0}},$$

и в любой точке подложки

$$\tau_{xy} = \frac{QE_2 y_i \left(y_0 - \frac{y_i}{2}\right)}{E_0 I_{x0}},$$

где y_0 – ордината упругого ЦТ двухслойного бруса относительно нижней кромки образца, которая определяется выражением

$$y_0 = \frac{E_1 a_1 \left(a_2 + \frac{a_1}{2}\right) + E_2 \frac{a_2^2}{2}}{a_1 E_1 + a_2 E_2},$$

где y_i – ордината точки относительно нижней кромки образца,

E_i – модуль упругости материала, в котором располагается точка.

$E_0 I_{x0}$ – жесткость при изгибе двухслойного бруса относительно оси x , которая определяется как

$$E_0 I_{x0} = E_1 \frac{a_1^3}{12} + E_2 \frac{a_2^3}{12} + E_1 a_1 (y_1 - y_0)^2 + E_2 a_2 (y_2 - y_0)^2,$$

где E_1 и E_2 – модули упругости материалов напыленного слоя и подложки соответственно.

В рассматриваемой задаче $M=Pl/4$ – изгибающий момент в среднем сечении образца, l – длина пролета (расстояние между опорами), P – сосредоточенная сила, приложенная посередине пролета.

Аналитический расчет выполнен для образцов (рис. 1, а) с толщиной подложки $a_2=1$ и 2 мм, толщина покрытия a_1 при этом изменялась от 0,2 до 0,6 и от 0,4 до 1,2 мм соответственно, так, чтобы отно-

сительная толщина покрытия (a_1/a_2) в обоих случаях составляла 0,2, 0,4 и 0,6. Рассчитывались напряжения в покрытии и подложке при изгибающем моменте $M=Pl/4$ и перерезывающей силе $Q = P$. Усилие на консоли $P/2$ принималось равным 50 Н и 200 Н в узлах с толщиной подложки 1 и 2 мм соответственно.

Эпюры напряжений в среднем сечении образца с толщиной подложки 1 мм при упругом нагружении, построенные на основании аналитического расчета (точки) и компьютерного моделирования (линии), приведены на рисунке 2.

Анализ результатов расчетов показал, что максимальные нормальные напряжения как в напыленном слое, так и подложке, значительно (на 2 порядка) превышают касательные. Таким образом, именно они являются основной причиной появления трещин в напыленном слое и пластических деформаций в подложке. При этом результаты расчетов по аналитическим формулам, основанным на законах механики твердого тела, и результаты компьютерного моделирования совпадают, что подтверждает адекватность моделирования.

Характер распределения нормальных напряжений существенно зависит от соотношения толщин напыленного слоя и подложки и не изменяется при пропорциональном их увеличении или уменьшении.

Наиболее нагруженными точками в сечении, где нормальные напряжения достигают максимальных значений, являются точки на поверхности напыленного слоя (точка 1, рис. 1, б) и на нижней поверхности подложки. Величина нормальных напряжений в напыленном слое на границе раздела уменьшается.

При увеличении приложенной нагрузки напряжения пропорционально (линейно) увеличиваются, а при увеличении общей толщины образца (a_1+a_2) они уменьшаются, нормальные – пропорционально ее квадрату, а касательные – линейно. В результате нормальные напряжения остаются неизменными при двукратном увеличении суммарной толщины и четырехкратном увеличении нагрузки, а касательные – при двукратном увеличении и суммарной толщины, и приложенной нагрузки, при всех вариантах сочетания толщин и жесткостей (модулей упругости) подложки и покрытия.

На уровень нормальных напряжений при неизменной толщине подложки влияет как относительная толщина напыленного слоя, так и его жесткость (рис. 3 и 4).

В исследуемых пределах изменения толщин и жесткостей напыленного слоя и подложки эти зависимости в упругой стадии деформирования с большой точностью описываются следующими уравнениями.

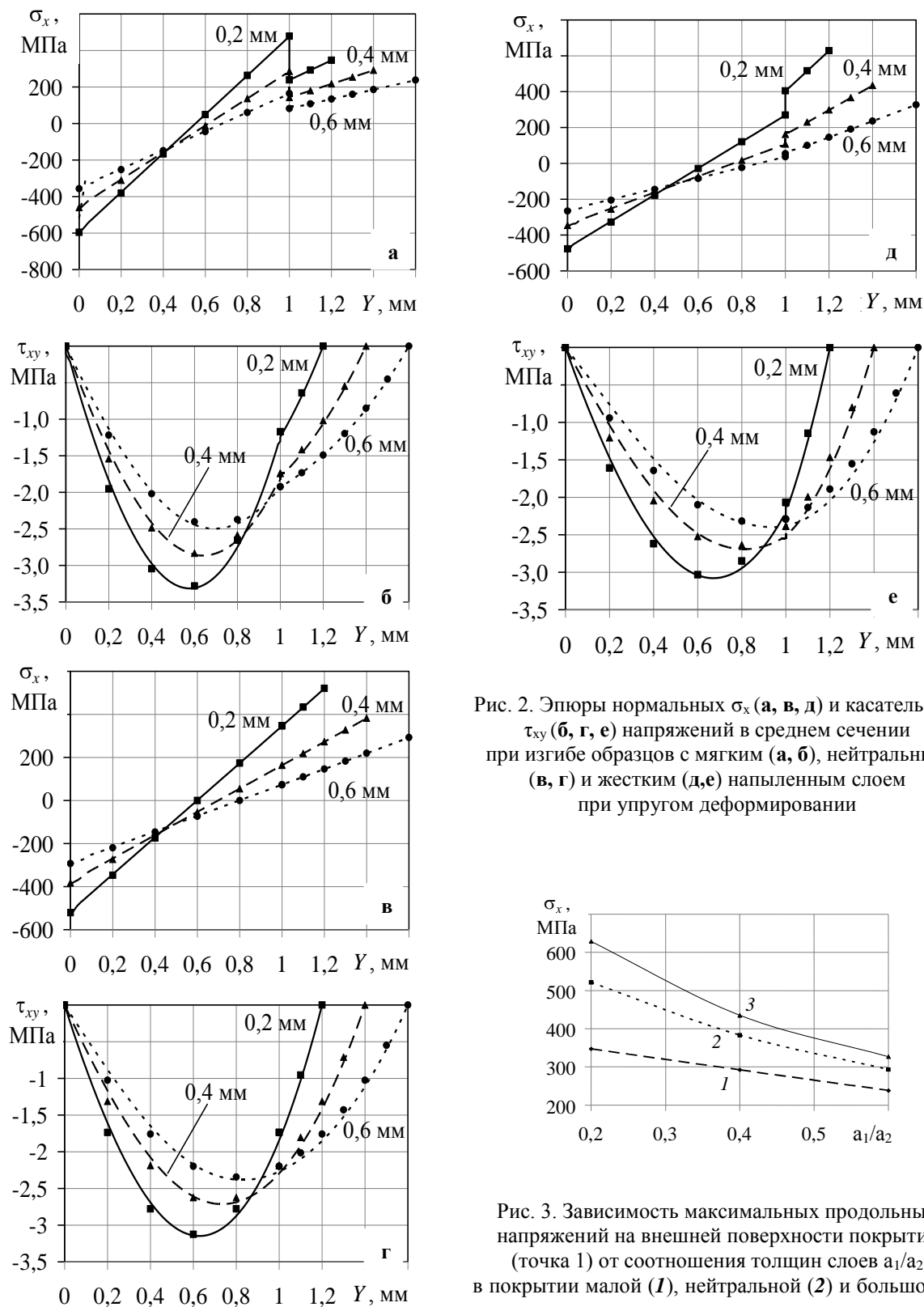


Рис. 2. Эпюры нормальных σ_x (а, в, д) и касательных τ_{xy} (б, г, е) напряжений в среднем сечении при изгибе образцов с мягким (а, б), нейтральным (в, г) и жестким (д, е) напыленным слоем при упругом деформировании

Рис. 3. Зависимость максимальных продольных напряжений на внешней поверхности покрытия (точка 1) от соотношения толщин слоев a_1/a_2 в покрытии малой (1), нейтральной (2) и большой (3) жесткости при упругом нагружении

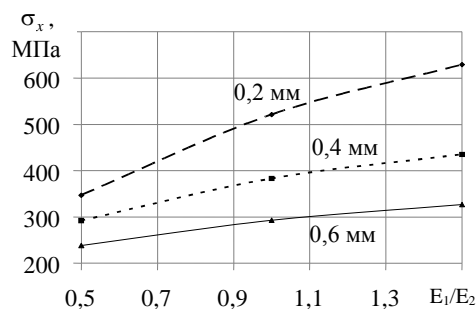


Рис. 4. Зависимость максимальных продольных напряжений на внешней поверхности покрытия (точка 1) от относительной жесткости слоев E_1/E_2 в покрытии с различной относительной толщиной a_1/a_2 при упругом нагружении

От относительной толщины:

– в образцах с жестким напыленным слоем ($E_1/E_2=1,5$)

$$\sigma_{x\max} = P/a_2^2(21,5(a_1/a_2)^2 - 32,3a_1/a_2 + 18,2);$$

– с нейтральным напыленным слоем ($E_1/E_2=1$)

$$\sigma_{x\max} = P/a_2^2(12(a_1/a_2)^2 - 21a_1/a_2 + 14,4);$$

– с мягким напыленным слоем ($E_1/E_2=0,5$)

$$\sigma_{x\max} = P/a_2^2(-5,45a_1/a_2 + 8,02).$$

От относительной жесткости (степени мягкости) прослойки:

– в образцах с тонкой прослойкой ($a_1/a_2=0,2$)

$$\sigma_{x\max} = P/a_2^2(-2,64(E_1/E_2)^2 + 10,9E_1/E_2 + 2,14);$$

– в образцах со средней прослойкой ($a_1/a_2=0,4$)

$$\sigma_{x\max} = P/a_2^2(-1,56(E_1/E_2)^2 + 6E_1/E_2 + 3,24);$$

– в образцах с толстой прослойкой ($a_1/a_2=0,6$)

$$\sigma_{x\max} = P/a_2^2(-0,84(E_1/E_2)^2 + 3,46E_1/E_2 + 3,24).$$

Таким образом, при изгибе образцов в упругой стадии увеличение относительной толщины напыленного слоя снижает уровень максимальных напряжений в нем (рис. 3). При этом в мягком напыленном слое максимальные напряжения уменьшаются с ростом относительной его толщины линейно, а в жестком - по более сложной зависимости, более интенсивно при малых толщинах и менее

интенсивно при больших. Увеличение относительной жесткости напыленного слоя увеличивает максимальные напряжения в нем (рис. 4), более интенсивно - при малой относительной его толщине.

При увеличении нагрузки уровень напряжений возрастает и вызывает пластические деформации. Исследование напряженного состояния с учетом пластического деформирования проводилось методом компьютерного моделирования на тех же моделях и при тех же нагрузках, при этом пределы текучести подложки и напыленного слоя принимались равными 300 и 650 МПа соответственно, так чтобы при принятых нагрузках пластически деформировался только материал подложки. Модуль упругости при пластическом деформировании принят равным $2 \cdot 10^3$ МПа.

Анализ эпюр напряжений (рис. 5) и их сравнение с аналогичными эпюрами при упругом деформировании показывает, что изменения соответствуют общим принципам механики. Эпюры не изменяются во всех вариантах жесткости с относительной толщиной напыленного слоя 0,6, в которых уровень эквивалентных напряжений в подложке при упругом нагружении не превышает предел текучести. В вариантах с меньшей толщиной напыленного слоя в результате повышения напряжений появляются пластические деформации вблизи нижней кромки подложки (толщина напыленного слоя 0,4 в вариантах с нейтральной прослойкой) и обеих кромок подложки (в варианте толщины напыленного слоя 0,2 мм). Об этом свидетельствуют горизонтальные участки эпюр.

Появление пластических деформаций в подложке в целом мало изменяет закономерности влияния соотношения толщин слоев и их жесткостей на максимальные напряжения в наиболее загруженной (верхней) точке покрытия (рис. 6 и 7). Увеличение относительной толщины напыленного слоя любой жесткости снижает уровень максимальных напряжений в нем, а увеличение относительной жесткости напыленного слоя любой толщины увеличивает максимальные напряжения.

Полученные в работе результаты с использованием нескольких методов теоретических исследований напряженного состояния напыленного слоя весьма полезны как для разработчиков оборудования для плазменного напыления в частности создания систем для манипулирования напыляемым изделием с различными геометрическими параметрами, а также технологом, которые определяют режимы напыления, материалы и приемы работы, которые обеспечат наиболее качественный конечный результат. Материалы настоящего исследования, совместно с результатами, изложенными в работах авторов [14, 15], в достаточно значимом объеме

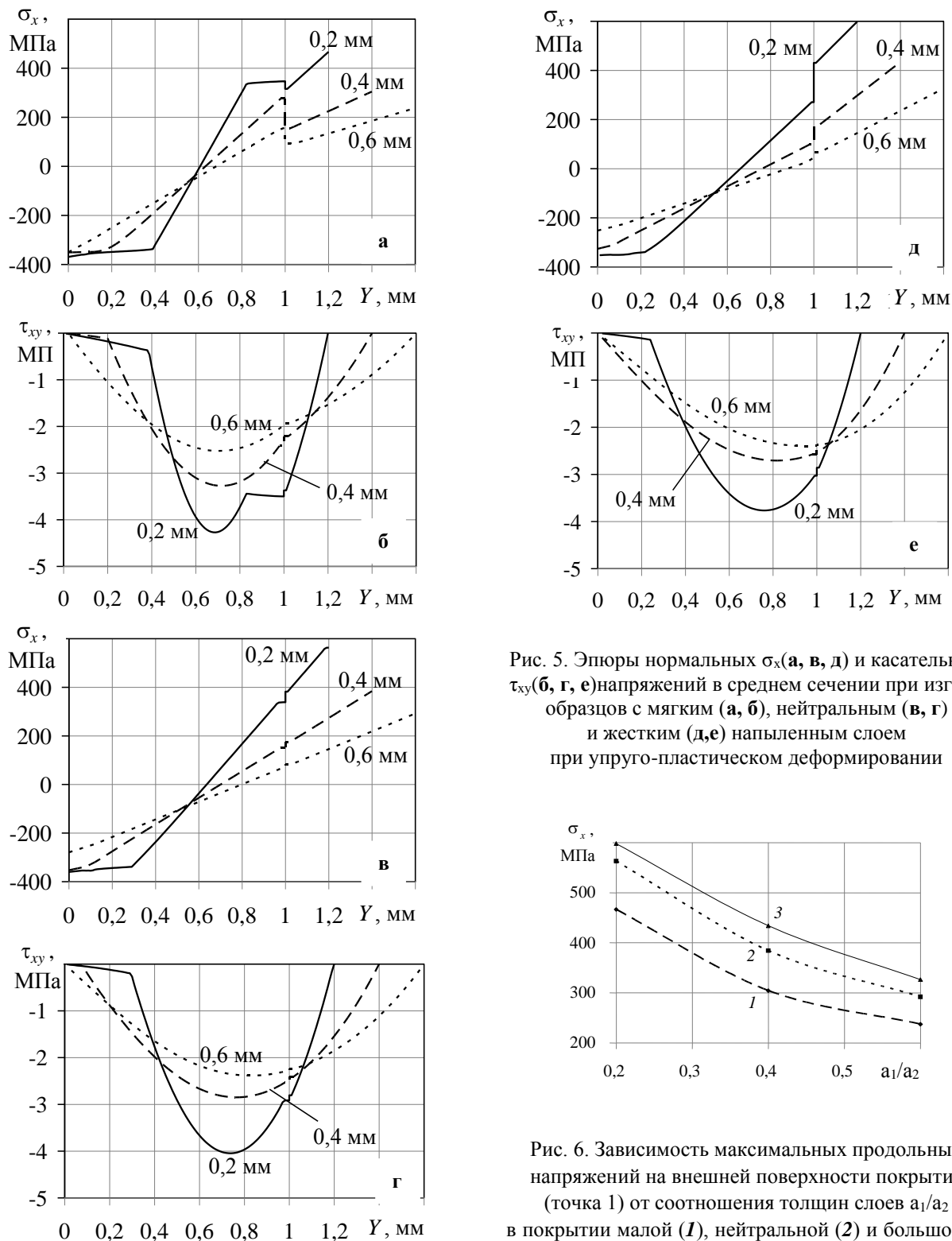


Рис. 5. Эпюры нормальных σ_x (а, в, д) и касательных τ_{xy} (б, г, е) напряжений в среднем сечении при изгибе образцов с мягким (а, б), нейтральным (в, г) и жестким (д, е) напыленным слоем при упруго-пластическом деформировании

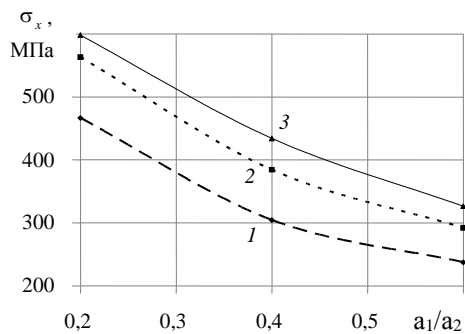


Рис. 6. Зависимость максимальных продольных напряжений на внешней поверхности покрытия (точка 1) от соотношения толщин слоев a_1/a_2 в покрытии малой (1), нейтральной (2) и большой (3) жесткости при упруго-пластическом нагружении

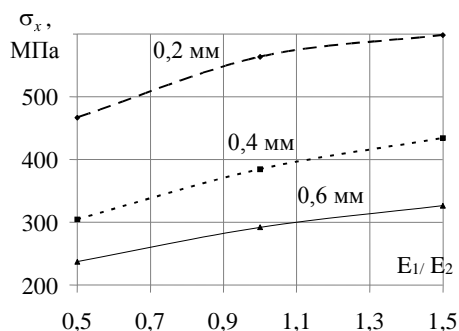


Рис. 7. Зависимость максимальных продольных напряжений на внешней поверхности покрытия (точка 1) от относительной жесткости слоев E_1/E_2 в покрытии с различной относительной толщиной a_1/a_2 при упруго-пластическом нагружении

описывают основные явления напряжённого состояния с выводами необходимых зависимостей и могут быть основанием для выработки целенаправленных технологических рекомендаций при напылении конкретных узлов и деталей как для авиационной техники, например, лопаток турбин, так и для других видов технических систем, где одним из основных требований является надёжность и ресурс.

Выводы

1. Методами аналитического расчета и компьютерного моделирования установлены количественные зависимости напряжений при изгибе образцов с напыленным слоем. Уровень и характер распределения продольных напряжений при изгибе образца с напыленным слоем в упругой стадии могут быть определены аналитическим расчетом, в пластической стадии – компьютерным моделированием.
2. Анализ результатов расчетов показал, что в напыленном слое, так и подложке, значительно (на 2 порядка) превышают касательные. Таким образом, именно они являются основной причиной появления трещин в напыленном слое и пластических деформаций в подложке.
3. Характер распределения напряжений существенно зависит от соотношения толщин напыленного слоя и подложки и не изменяется при пропорциональном их увеличении или уменьшении.
4. Наиболее нагруженными точками в среднем сечении, где нормальные напряжения достигают максимальных значений, являются точки на поверхности напыленного слоя и на нижней поверхности подложки.
5. На уровень напряжений при неизменной толщине подложки влияет как относительная толщина напыленного слоя, так и его жесткость. Мак-

симальные напряжения в напыленном слое снижаются с увеличением его относительной толщины и увеличиваются с ростом его относительной жесткости.

Литература

1. Гецов, Л. Б. Детали газовых турбин [Текст] / Л. Б. Гецов. – Л. : Машиностроение, 1982. – 296 с.
2. Pfender, L. F. Trends in Thermal Plasma Technology. Thermal Plasma Torches and Technologies [Text] / L. F. Pfender // Cambridge International Science Publishing. – 2003. – Vol. 1. Plasma Torches. Basic Studies and Design. – P. 20-41.
3. Мовчан, Б. А. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме [Текст] / Б. А. Мовчан, Н. С. Малащенко. – К. : Наукова думка, 1983. – 231 с.
4. Лой, С. А. Плазменное напыление защитных покрытий на детали горячего тракта судовых турбин [Текст] / С. А. Лой, А. Н. Дубовой // Збірник наукових праць УДМТУ. – 1999. – № 6 (366). – С. 105–109.
5. Лой, С. А. Повышение эффективности плазменного напыления защитных покрытий [Текст] / С. А. Лой, А. Н. Дубовой // Збірник наукових праць УДМТУ. – 1999. – № 2 (362). – С. 68–75.
6. Елисеев, Ю. С. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиационном двигателестроении [Текст] / Ю. С. Елисеев, Н. В. Абраимов, В. В. Крымов. – М. : Высшая школа, 1999. – 525 с.
7. Термостойкость азотированной стали H26ЮЗТБ [Текст] / А. В. Бильченко, В. Г. Горбач, А. И. Дудка, А. В. Любомский // Вісник СевНТУ, Сер. «Механіка, енергетика, екологія». – 2011. – Вып. 120. – С. 131.
8. Хаскин, В. Ю. Комбинированное лазерно-микроразрядное нанесение керамических покрытий на стали [Текст] / В. Ю. Хаскин // Доповіді Національної академії наук України. – 2007. – № 8. – С. 99–102.
9. Лузан, С. А. Исследование остаточных напряжений в напыленных покрытиях [Текст] / С. А. Лузан, В. Н. Кальянов // Сварочное производство. – 1986. – № 1. – С. 2–4.
10. Долгов, Н. А. Метод определения модуля упругости газотермических покрытий [Текст] / Н. А. Долгов // Порошковая металлургия. – 2004. – № 7/8. – С. 110–115.
11. Возникновение и перераспределение внутренних напряжений в электродуговых покрытиях во время их формирования [Текст] / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгунук, И. И. Сидорак, Ю. В. Дзьоба, И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2006. – № 10. – С. 15–19.
12. Кулик, А. Я. Остаточные напряжения в оксидных плазменных покрытиях [Текст] / А. Я. Кулик, Е. А. Шаронов, А. Ю. Мезерницкий // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. – Рига : Зинатне, 1980. – Том 2. – С. 12–16.

13. Теплообмен и термические напряжения при нанесении газотермических покрытий на полужку [Текст] / И. Л. Куприянов, М. А. Геллер, Г. Е. Горелик, А. В. Мазовко // *Физика и химия обработки материалов*. – 1988. – № 3. – С. 27–31.

14. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на термостойкость [Текст] / В. А. Лебедев, Г. В. Ермолаев, С. А. Лой, М. В. Матвиенко // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2014. – № 11. – С. 8-12.

15. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на отрыв [Текст] / В. А. Лебедев, Г. В. Ермолаев, С. А. Лой, М. В. Матвиенко // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2014. – № 12. – С. 8-12.

16. Kopylov, V. Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties [Text] / V. Kopylov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 5, No. 5(83). – P. 49–57. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.79586

17. Зеленина, Е. А. Метод расчета физико-механических характеристик плазменного покрытия на подложке при испытаниях образцов на изгиб [Текст] / Е. А. Зеленина, С. В. Лоскутов, А. В. Ершов // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2016. – № 2. – С. 107–110.

18. Guessasma, S. Modeling of the APS Plasma Spray Process Using Artificial Neural Networks: Basis, Requirements and an Example [Text] / S. Guessasma, G. Montavon, C. Coddet // *Computational Materials Science*. – 2004. – Vol. 29 (3). – P. 315-333.

19. Паяння матеріалів [Текст] / Г. В. Ермолаев, В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, С. В. Максимова, В. Ф. Хорунов, В. В. Чигарьов. – Миколаїв : НУК, 2015. – 340 с.

References

1. Getsov, L. B. *Detali gazoviyh turbin* [Gas turbine parts]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1982. 296 p.

2. Pfender, L. F. Trends in Thermal Plasma Technology. Thermal Plasma Torches and Technologies. Cambridge International Science Publishing, 2003, vol. 1, *Plasma Torches. Basic Studies and Design*, pp. 20-41.

3. Movchan, B. A., Malashenko, N. S. *Jarostoykie pokryitiya, osajdaemyie v vakuume* [Heat-resistant coatings deposited in vacuum]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983. 231 p.

4. Loj, S. A., Dubovoy, A. N. Plazmennoe napylenie zashchitnyh pokrytij na detali goryachego trakta sudovyh turbin [Plasma spraying of protective coatings on parts of the hot path of ship turbines]. *Zbirnik naukovih prac' UDMTU*, 1999, no. 6 (366), pp. 105–109.

5. Loy, S. A., Dubovoy, A. N. Povyishenie effektivnosti plazmennogo napyleniya zashchitnyh pokryitiy [Improving the effectiveness of plasma spraying of protective coatings]. *Zbirnik naukovih prats UDMTU*, 1999, no. 2 (362), pp. 68–75.

6. Eliseev, Yu. S., Eliseev, N. V., Abraimov, V. V. Kryimov, Yu. S. *Himiko-termicheskaya obrabotka i zashchitnye pokryitiya v aviadvigatelsestroenii* [Chemical heat treatment and protective coatings in aircraft engine building]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1999. 525 p.

7. Bilchenko, A. V., Bilchenko, A. V., Gorbach, V. G., Dudka, A. I., Lyubomskiy, A. V. Termostoykost azotirovannoy stali N26YU3TB [Heat resistance of nitrated steel H26IO3TB]. *Visnik SevNTU, Ser. «Mechanika, energetika, ekologiya»*, 2011, vol. 120, pp. 131.

8. Haskin, V. Yu. Kombinirovannoe lazernomikroplazmennoe nanesenie keramicheskikh pokryitiy na stali [Combined laser-microplasma coating of ceramic coatings on steel]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukraini*, 2007, no. 8, pp. 99–102.

9. Luzan, S. A., Kalyanov, V. N. Issledovanie ostatochnykh napryajeniy v napyilennykh pokryitiyah [Investigation of residual stresses in sprayed coatings]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1986, on. 1, pp. 2–4.

10. Dolgov, N. A. Metod opredeleniya modulya uprugosti gazotermicheskikh pokryitiy [Method for determining the elastic modulus of thermal spray coatings]. *Poroshkovaya metalurgiya*, 2004, no. 7/8, pp. 110–115.

11. Pohmurskiy, V. I., Student, M. M., Dovgunyik, V. M., Sidorak, I. I., Dzoba, Yu. V., Ryabtsev, I. A. Vozniknovenie i pereraspredelenie vnutrennih napryajeniy v elektrodugovykh pokryitiyah vovremya ih formirovaniya [The emergence and redistribution of internal stresses in electric arc coatings during their formation]. *Avtomatskaya svarka*, 2006, no. 10, pp. 15–19.

12. Kulik, A. Ya., Sharonov, E. A., Mezernitskiy, A. Yu. Ostatochnyie napryajeniya v oksidnih plazmennyykh pokryitiyah. [Residual stresses in oxide plasma coatings]. *Teoriya i praktika gazotermicheskogo naneseniya pokryitiy – Theory and practice of thermal spray coating*, Riga, Zinatne Publ., 1980, vol. 2, pp. 12–16.

13. Kupriyanov, I. L., Geller, M. A., Gorelik, G. E., Mazovko, A. V. Teploobmen i termicheskie napryajeniya pri nanesenii gazotermicheskikh pokryitiy na polozhku [Heat transfer and thermal stresses when applying gas-thermal coatings on the pole]. *Fizika i himiya obrabotki materialov*, 1988, no. 3, pp. 27–31.

14. Lebedev, V. A., Ermolaev, G. V., Loy, S. A., Matvienko, M. V. Napryajennoe sostoyanie napyilennogo pokryitiya pri ispyitaniyah na termostoykost [The stress state of the sprayed coating when tested for heat resistance]. *Uprochnyayuschie tehnologii i pokryitiya*, 2014, no. 11, pp. 8-12.

15. Lebedev, V. A., Ermolaev, G. V., Loy, S. A., Matvienko, M. V. Napryajennoe sostoyanie napyilennogo pokryitiya pri ispyitaniyah na otriv [The stress state of the sprayed coating during peel tests]. *Uprochnyayuschie tehnologii i pokryitiya*, 2014, no. 12, pp. 8-12.

16. Kopylov, V. Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*,

2016, vol. 5, no. 5(83), pp. 49-57. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.79586.

17. Zelenina, E. A., Loskutov, S. V., Ershov, A. V. Metod rascheta fiziko-mehaniicheskikh harakteristik plazmennogo pokryitiya na podlojke pri ispytaniyah obraztsov na izgib [Method for calculating the physico-mechanical characteristics of a plasma coating on a substrate when testing bending specimens]. *Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, 2016, no. 2, pp. 107 – 110.

18. Guessasma, S., Montavon, G., Coddet, C. Modeling of the APS Plasma Spray Process Using Artificial Neural Networks: Basis, Requirements and an Example. *Computational Materials Science*, 2004, vol. 29 (3), pp. 315-333.

19. Yermolayev, G. V., Kvasnyczkyj, V. V., Kvasnyczkyj, V. F., Maksymova, S. V., Xorunov, V. F., Ch`gar`ov, V. V. *Payannya materialiv* [Soldering materials]. Mykolayiv, NUK Publ., 2015. 340 p.

Поступила в редакцию 31.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ПЛОСКИХ ЗРАЗКІВ З НАПИЛЕННИМ ШАРОМ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ НА ВИГИН

В. О. Лебедев, С. А. Лой, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвієнко

Предметом вивчення є виконаний аналіз напруженого стану при вигині, як у пружній, так і у пружно-пластичній стадії, плоского зразка з напиленим шаром, що має інші механічні властивості (модуль пружності і межу плинності), ніж матеріал підкладки. **Метою** є вибір варіантів покриттів малої (м'який шар), нейтральної і великої (жорсткий шар) жорсткості по відношенню до основного металу, що має меншу межу плинності, при різних співвідношеннях їх товщини (0,2, 0,4 і 0,6). **Завдання:** виконати аналіз розподілу нормальних напружень, визначити найбільш завантажені точки на поверхні напиленого шару і на нижній поверхні підкладки, визначити умови і причини появи тріщин у напиленому шарі і пластичних деформацій у підкладці. Використаними **методами** є комп'ютерне моделювання та аналітичні розрахунки. Отримано наступні **результати**. Характер розподілу нормальних напружень істотно залежить від співвідношення товщини напиленого шару і підкладки та не змінюється при пропорційному їх збільшенні або зменшенні. Найбільш завантаженими точками в перерізі, де нормальні напруги досягають максимальних значень, є точки на поверхні напиленого шару і на нижній поверхні підкладки. Максимальні нормальні напруження як у напиленому шарі, так і підкладці, значно (на 2 порядки) перевищують дотичні. Таким чином, саме вони є основною причиною появи тріщин у напиленому шарі і пластичних деформацій у підкладці. При цьому результати розрахунків за аналітичними формулами, заснованими на законах механіки твердого тіла, і результати комп'ютерного моделювання збігаються, що підтверджує адекватність моделювання. На рівень напружень при незмінній товщині підкладки впливає як відносна товщина напиленого шару, так і його жорсткість. Максимальні напруження в напиленому шарі знижуються зі збільшенням його відносної товщини і збільшуються з ростом його відносної жорсткості. **Висновки.** Отримані різними методами теоретичних досліджень результати дозволяють визначити напрямки вдосконалення обладнання, технологічних прийомів вибору режимів, активних матеріалів для отримання напилених шарів з високою якістю для вузлів і деталей різних конфігурацій і різних матеріалів виробів і матеріалом що напилюється. Висновки роботи можуть бути використані на практиці при розробці технологічних карт ведення процесів напилення. **Наукова новизна** отриманих результатів полягає в наступному: удосконалено методи вивчення напруженого стану плоских зразків з напиленим шаром при випробуваннях на вигин; вперше отримані результати впливу комплексу характеристик умов напилення на характеристики міцності напиленого шару підкладки.

Ключові слова: напилений шар; випробування на вигин; напружений стан; пружне і пружно-пластичне вантаження.

THE STRESS STATE OF FLAT SPECIMENS WITH SPRAYED LAYER IN THE FLEXURE TESTS

V. A. Lebedev, S. A. Loy, G. V. Ermolaev, M. V. Matvienko

The subject of study is the analysis of the stress state during bending, both in the elastic and elastic-plastic stages, of a flat sample with a sprayed layer having different mechanical properties (elastic modulus and yield strength) than the substrate material. The goal is to select options for coatings of small (soft layer), neutral and large (hard layer) stiffness concerning the base metal, which has a lower yield strength, with different ratios of their thicknesses (0.2, 0.4 and 0.6). Tasks: to analyze the distribution of normal stresses, to determine the most loaded points on the surface of the sprayed layer and on the lower surface of the substrate, to determine the conditions and causes of the appearance of cracks in the sprayed layer and plastic deformations in the substrate. The methods used are computer simulations and analytical calculations. The following results were obtained. The nature of the distribution of normal stresses substantially depends on the ratio of the thicknesses of the sprayed layer and the substrate and does not change with their proportional increase or decrease. The most loaded points in the section where the normal stresses reach maximum values are the points on the surface of the sprayed layer and on the bottom surface of the

substrate. The level of maximum normal stresses both in the sprayed layer and the substrate significantly exceeds (by 2 orders of magnitude) the tangents. That is, they are the main cause of the appearance of cracks in the sprayed layer and plastic deformations in the substrate. At the same time, the results of calculations using analytical formulas based on the laws of solid mechanics and computer simulations are the same, which confirms the adequacy of the modeling. The level of stresses at a constant thickness of the substrate is affected by both the relative thickness of the sprayed layer and its rigidity. The maximum stresses in the sprayed layer decrease with an increase in its relative thickness and increase with an increase in its relative rigidity. Conclusion. The results obtained by various methods of theoretical studies allow us to determine the directions of improvement of equipment, technological methods of selecting modes, active materials for producing sprayed layers with high quality for assemblies and parts of various configurations and different materials of products and sprayed with the material. The findings of the work can be used in practice in the development of technological maps of the processes of deposition. The scientific novelty of the obtained results consists of the following: methods for studying the stress state of flat samples with a sprayed layer during bending tests have been improved; for the first time, the results of the influence of a set of characteristics of the deposition conditions on the strength characteristics of the sprayed layer on the substrate were obtained.

Keywords: sprayed layer; bending tests; stress state; elastic and elastic-plastic loading.

Лебедев Владимир Александрович – д-р техн. наук, проф., Главный конструктор, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев.

Лой Сергей Анатольевич – доцент Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, старший преподаватель кафедры сварки, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Херсон.

Ермолаев Геннадий Владимирович – канд. техн. наук, проф., зав. каф. сварки, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Херсон.

Матвиенко Максим Валентинович – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. сварки, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Херсон.

Lebedev Vladimir Aleksandrovich – Dr. Tech. Sciences, Professor, Chief Designer Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: valpaton@ukr.net, ORCID Author ID:0000-0003-0391-6113.

Loy Sergey Anatolyevich – Associate Professor National University of Shipbuilding, Senior Lecturer of the Department of Welding, Kherson branch Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-1936-6390.

Ermolaev Gennady Vladimirovich – Cand. Tech. Sciences, Professor, Head of the Department of Welding of the Kherson branch of the National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-8903-5669, ResearcherID: U-4052-2017, Scopus Author ID: 6603361122, ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Gennadii_Yermolaiev.

Matvienko Maxim Valentinovich – Cand. Tech. Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Welding, Kherson branch Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-1020-0415, ResearcherID: V-4789-2017, Scopus Author ID: 6603614513.