

**АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ТЕРМОДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ НА МЕДНОЙ  
ПОДЛОЖКЕ**

**В. Г. ДАШКЕВИЧ** канд. техн. наук, **И. В. ПЛЕТЕНЕВ,**  
**М. А. СУДНИКОВ**  
Белорусский национальный технический университет

*Рассмотрены вопросы деформации плоского металлического элемента с диффузионным слоем, отмечены теории, описывающие механику деформации, жесткости, однослойных и многослойных систем в виде пластин; приведены расчетные формулы для определения чистого изгиба пластинчатого элемента с диффузионным слоем. На примере алитированного слоя на медной подложке приведены экспериментальные данные по изгибу и особенностям разрушения пластинчатого элемента. Установлена зависимость угла загиба от величины нагрузки, вызывающей его, приведено сравнение с теоретически рассчитанной величиной деформации.*

**Ключевые слова:** термодиффузионные слои, структура, изгиб пластины, упругопластические свойства.

**ANALYSIS AND PREDICTION OF ELASTIC-PLASTIC  
PROPERTIES OF THERMODIFFUSION LAYERS  
ON A COPPER SUBSTRATE**

**V. G. DASHKEVICH**, Ph. D. in Technical Scitnces,  
**I. V. PLETENEV, M. A. SUDNIKOV**  
Belarusian National Technical University

*The issues of deformation of a flat metal element with a diffusion layer are considered, theories describing the mechanics of deformation, rigidity, single-layer and multilayer systems in the form of plates are noted, calculation formulas are given for determining the pure bending of a plate element with a diffusion layer. On the example of an aluminized layer on a copper substrate, experimental data on the bending and fracture features of a plate element are presented. The dependence of the angle of bending on the magnitude of the load causing it is*

*established, a comparison is made with the theoretically calculated magnitude of the deformation.*

**Keywords:** *thermal diffusion layers, structure, plate bending, elastic-plastic properties.*

**Введение.** Существуют различные способы защиты поверхности металлических изделий от механических воздействий. При использовании технологий, обеспечивающих высокие значения твердости материала и, соответственно, износостойкости, в поверхностных слоях изделий пластичность снижается вплоть до таких значений, когда незначительные деформации в упругой зоне уже способны разрушить его целостность. Поэтому прогнозирование вероятности разрушения изделий с различными защитными слоями (диффузионного или недиффузионного типа) является важной научно-практической задачей. Для термодиффузионных защитных слоев, полученных химико-термической обработкой, литературные данные по упругопластическим характеристикам защитного слоя приведены в недостаточном объеме. В частности, в работах [1–3] приведены упругопластические свойства боридных термодиффузионных слоев на стержневых элементах в виде проволоки на разнообразных плоских элементах. В некоторых работах по термодиффузионному цинкованию также упоминаются упругопластические характеристики [4, 5], поскольку они имеют важное значение для изделий в виде пружин, гроверных шайб и т. д. При описании деформационных процессов, происходящих при разрушении в однородных материалах, используются различные теории. Например, при описании изгиба тонких пластин с малыми прогибами расчет производят по теории Кирхгофа–Лява; когда речь идет о тонких пластинах с большими прогибами – по теории Фешля–фон Кармана, для толстых пластин – по теории Миндлина [6]. Отметим, что под тонкими пластинами принято понимать пластины, у которых отношение толщины к наименьшему размеру в ее основании меньше или равно 0,2.

**Результаты исследований.** Известно, что если пластина находится в ненапряженном состоянии и является тонкой, то ее жесткость ( $D$ ) определяется по уравнению [7]:

$$D = \frac{EH^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $H$  – толщина пластины;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Формула (1) используется для однородных материалов. При оценке механики поведения многослойных систем под нагрузкой исходная задача является менее изученной. Эта задача имеет ряд частных решений, например, используется вариант с приведенным значением модуля Юнга и средним значением коэффициента Пуассона. Такой подход с нашей точки зрения вполне может подойти для реализации прогнозирования деформационных процессов пластин с диффузионным слоем. Однако, в рассматриваемом случае (тонкая пластина) будет использован ряд допущений, которые, например, не будут учитывать напряженное состояние или получаемую дефектность слоя, а также наличие во многих случаях развитой переходной зоны между слоем и основой и т. д.

Для дальнейшего описания возможностей прогнозирования процесса пластической деформации при чистом изгибе элемента в виде пластин выбрали расчетную схему, приведенную на рисунке 1. В схеме рассматривается трехслойная пластина, причем слой симметрично расположен и имеет всегда одинаковую толщину с обеих сторон, поскольку получается диффузионным путем.

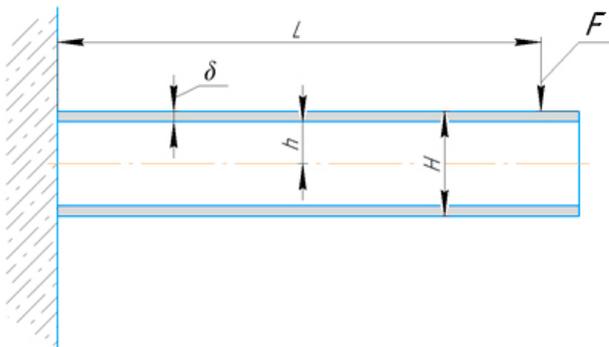


Рисунок 1 – Расчетная схема изгиба консольно закрепленной пластины с термодиффузионным слоем

Приведенный модуль упругости для пластины с одинаковыми толщинами по обе стороны будет выглядеть следующим образом:

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{осн}} \left( \frac{1}{3} \delta^4 + \delta^3 h + \delta^2 h^2 \right) + E_{\text{сл}} \frac{1}{3} \delta^3}{(\delta + h) \left( \frac{1}{3} \delta^2 + \delta^2 h + \delta h^2 \right)} = K_{\text{осн}} E_{\text{осн}} + K_{\text{сл}} E_{\text{сл}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{осн}}$  – модуль Юнга основного металла;  $E_{\text{сл}}$  – модуль Юнга диффузионного слоя;  $h$  – половина толщина основного металла пластины;  $\delta$  – толщина диффузионного слоя пластины;

Значения коэффициентов  $K_{\text{осн}}$  и  $K_{\text{сл}}$  зависят от отношения толщин  $\delta$  и  $h$  (таблица 1) [6].

Таблица 1 – Значение коэффициентов  $K_{\text{осн}}$  и  $K_{\text{сл}}$

$\delta / h$	$K_{\text{осн}}$	$K_{\text{сл}}$
1	0,438	0,0625
2	0,234	0,198
3	0,144	0,316
4	0,0976	0,410

Так как коэффициент Пуассона не зависит от размеров изделия [7, 8], а зависит только от типа материала, то рассчитывать его можно с помощью среднеарифметического двух коэффициентов:

$$\mu_{\text{пр}} = \frac{\mu_{\text{осн}} + \mu_{\text{сл}}}{2}, \quad (3)$$

где  $\mu_{\text{осн}}$  – коэффициент Пуассона основного металла;  $\mu_{\text{сл}}$  – коэффициент Пуассона диффузионного слоя.

В результате для расчета перемещения свободного края консолюдно закрепленной пластины ( $w$ ) можно воспользоваться следующим выражением:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{12FL(1 - \mu_{\text{пр}}^2)}{E_{\text{пр}} H^3}, \quad (4)$$

где  $F$  – нагрузка;  $L$  – расстояние от места крепления пластины до точки приложения нагрузки;

Интегрируя это выражение, можно определить перемещение пластины, ее деформацию от изгибающего момента, образующегося от нагрузки  $F$  (рисунок 1).

В экспериментальной части работы проанализированы результаты деформации пластинчатого элемента (ламели) с термодиффузионным алитированным слоем на медной подложке (медь марки М1) при разрушении. Структура такого слоя представляет собой слоистую систему, состоящую из алюминидных фаз. При химико-термической обработке медной пластины, например, при температуре 560 °С и длительностью 2–6 ч образуется диффузионный слой (рисунок 2), в котором просматриваются три зоны: ближе к поверхности – твердый раствор с высокой концентрацией алюминия; глубже – комплекс алюминидных фаз, твердые растворы на основе соединений  $\text{Cu}_3\text{Al}$  и  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  и в самой глубине – переходная зона (до 8 % Al масс.), представляющая собой  $\alpha$ -фазу [9].

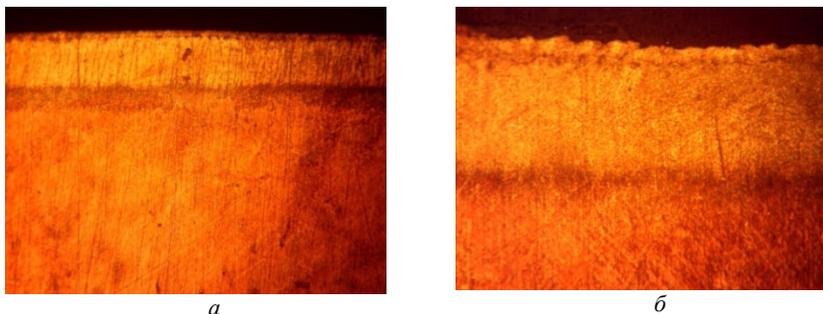


Рисунок 2 – Микроструктура алитированного слоя на меди:  
 $a$  –  $\times 100$ ;  $b$  –  $\times 500$

Отметим, что такая структура слоя и его морфология получается в случае низкотемпературного насыщения, поскольку при алитировании температура насыщения, как правило, выше 560 °С и, соответственно, получается другое распределение фаз.

Важным этапом исследования являлся анализ процесса разрушения слоя. При деформации изгибом разрушение пластинчатого элемента с диффузионным слоем может проходить за счет распространяющейся трещины, которая уходит через диффузионный слой

вглубь изделия, или растрескиванием, скалыванием диффузионного слоя, когда трещина локализуется только в слое и не уходит в основной металл. Это будет зависеть от упругопластических свойств основного металла, от упругопластических свойств самого слоя, его толщины и морфологии.

Результаты нагружения с использованием модели покрытий при нормальных и касательных нагрузках, в которой покрытие моделируется упругим, идеально контактирующим с упругой подложкой, показывают значительное влияние толщины покрытия на характер разрушения [2].

Следует отметить, что влияние формы структурных составляющих термодиффузионного слоя на процесс разрушения изделия мало изучено. Например, термодиффузионные боридные слои в связи со своим игольчатым строением могут выступать в качестве инициаторов появления зародышевой трещины, так как не имеют достаточных скруглений на конце иглы.

Еще одним фактором, влияющим на процесс разрушения, является однородность слоя. Рассматриваемый алитированный слой имеет достаточно однородную структуру. При термодиффузионной обработке в любом случае образуется градиент концентрации насыщающего элемента(ов), но величина может быть разной. Могут формироваться микронеоднородности в структуре слоя, которые превращают диффузионный слой в слой композиционного строения. Объемная доля микронеоднородностей, формирующихся при диффузионных процессах, например, при расслоении ранее образовавшейся фазы, коагуляций и др., будет снижать адекватность рассматриваемой расчетной схемы (рисунок 1).

Для наблюдения процесса изгиба пластины была спроектирована и изготовлена специальная оснастка, позволяющая проводить плавное нагружение пластины изгибающим моментом, регистрацию угла загиба, наблюдение поверхности через бинокулярный микроскоп и тензометрию (рисунок 3).

Внешний вид образцов при разрушении диффузионного слоя представлен на рисунке 4. Процесс начинается у краев пластины и проявляет себя поперечными трещинами, которые распространяются по всей длине слоя. Разрушение с углов объясняется наличием краевого эффекта при процессах термодиффузионной обработки. То есть углы пластины имеют небольшой «нарост» слоя и провоци-

руют появление трещины. Скалывание происходит от самого верхнего слоя; пластичность слоев, лежащих более глубоко, достаточна для деформации на соответствующий угол, поэтому трещина не распространяется в основной металл, а локализуется в диффузионном слое.

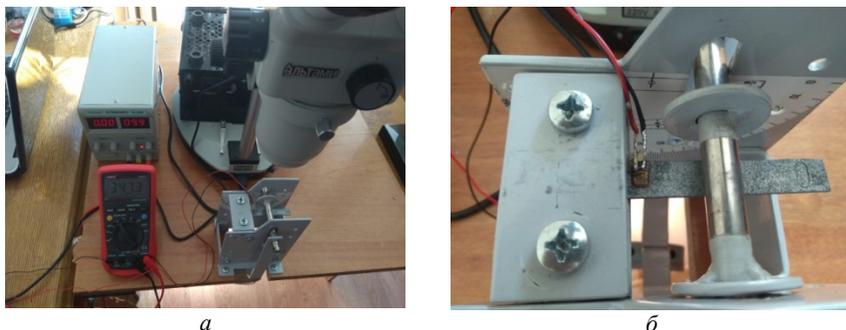


Рисунок 3 – Внешний вид оснастки для исследования пластичности (жесткости) пластины с термодиффузионным слоем:  
*a* – общий вид; *б* – узел крепления и изгиба образца

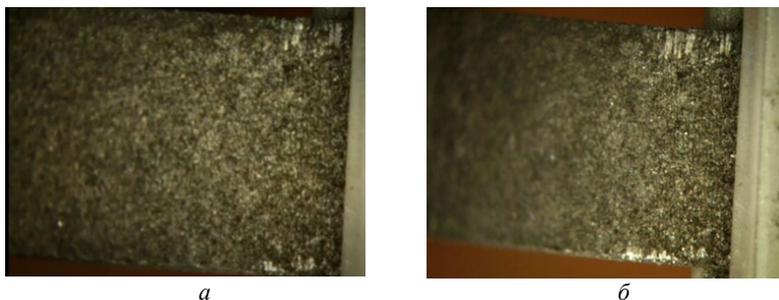


Рисунок 4 – Внешний вид образцов в момент зарождения и роста поперечных трещин в пластине с термодиффузионным слоем:  
*a* – зарождение трещин; *б* – развитие трещин

В результате анализа поведения пластинчатого материала с различной толщиной диффузионного слоя можно отметить параболическую зависимость угла загиба и нагрузки, спровоцировавшей его (рисунок 5).

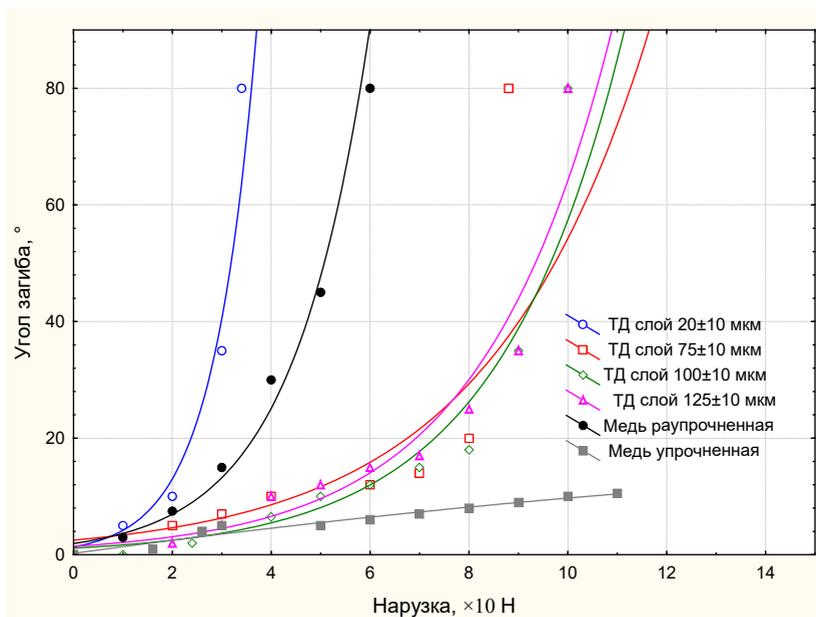


Рисунок 5 – Зависимость угла загиба пластинчатого элемента характеризующего разрушение диффузионного слоя и изгибающей нагрузки

Проведенные расчеты деформации пластинчатого элемента показывают, что, как правило, расчетные значения на 20 и более % ниже реально определенной деформации при испытаниях. Тем не менее, такой подход представляется перспективным, поскольку дает общее представление о возможностях изделий с диффузионным слоем выдерживать упругие и пластические деформации небольшой величины.

**Выводы.** Деформация нежестких элементов с диффузионным защитным слоем может приводить к отслоению и разрушению слоя. Поэтому оценка и установление предельного состояния, которое не вызовет это разрушение, является важной задачей. Для пластинчатого элемента, имеющего диффузионный алитированный слой, приведена формула и произведен расчет деформации с целью сравнения расчетных значений с экспериментальными данными. Установлена зависимость угла загиба пластинчатого элемента с диффузионным алитированным слоем различной толщины до момента разрушения от величины нагрузки, вызывающей загиб.

## Список литературы

1. **Дашкевич, В. Г.** Поверхностно-легированная стальная проволока для наплавки деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01: / В. Г. Дашкевич; Белорус. нац. техн. ун-т – Полоцкий государственный университет. – Минск, 2009. – 178 с.

2. **Мартынов, С. А.** Моделирование процессов деформации и разрушения материала с криволинейной границей раздела «пластичная подложка–хрупкое покрытие»: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / С. А. Мартынов; Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2016. – 127 с.

3. **Моделирование** напряженно – деформированного состояния тонких композитных покрытий на основе решения плоской задачи градиентной теории упругости для слоя / Лурье С. А. [и др.]. // Вестник Пермского нац. иссл. политехнического ун-та. Механика. – 2013. – № 1 – С. 161 – 181.

4. **Булойчик, И. А.** Термодиффузионное цинкование улучшаемых и пружинных сталей / И. А. Булойчик // Литье и металлургия. – 2013. – № 4. – С. 121–124.

5. **Song, G. M.** Characterization of the failure behaviour of zinc coating on dual phase steel under tensile deformation, 2011 Mat. Sci. Eng. A-Struct. 528(21). – P. 6432–6437.

6. **Лурье, А. И.** Theory of elasticity / А. И. Лурье ; А. I. Lurie ; transl. by A. Belyaev. – Berlin [etc.]: Springer, 2005. – 1050 с.

7. **Чемодуров, В. Т.** Расчет многослойной пластины с приведенной жесткостью / В. Т. Чемодуров, П. М. Канцеров // Строительство и техногенная безопасность. – 2012. – № 42. – С. 18–25.

8. **Тимошенко, С. П.** Теория упругости. / С. П. Тимошенко. – М: Наука, 1975. – 620 с.

9. **Константинов, В. М.** Исследование особенностей структуры и свойств термодиффузионных жаростойких покрытий на меди / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, И. В. Плетенев // Литье и металлургия. – 2021. – № 1. – С. 124–129.

## References

1. **Dashkevich, V. G.** *Poverhnostno-legirovannaya stal'naya provoloka dlya naplavki detalej mashin, rabotayushchih v usloviyah abraziivnogo iznashivaniya* [Surface-alloyed steel wire for surfacing machine parts operating under abrasive wear]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.01 / V. G. Dashkevich; Belarusian National Technical University – Polotsk State University. – Minsk, 2009. – 178 p.

2. **Martynov, S. A.** *Modelirovanie processov deformacii i razrusheniya materiala s krivolinejnoj granicej razdela «plastichnaya podlozhka–hrupkoe pokrytie»* [Modelling of the processes of deformation and destruction of a material with a curvilinear interface “plastic substrate-brittle coating”]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 01.02.04 / S. A. Martynov; National Research Tomsk State University, 2016. – 127 p.

3. **Modelirovanie** *napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tonkih kompozitnyh pokrytij na osnove resheniya ploskoj zadachi gradientnoj teorii uprugosti dlya sloya* [Simulation of the stress-strain state of thin composite coatings based on the solution of a plane problem of the gradient theory of elasticity for a layer] / S. A. Lur'e [et al.] // *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika = Perm National Research Polytechnic University. Mechanics.* – 2013. – No. 1. – P. 161–181.

4. **Bulojchik, I. A.** *Termodiffuzionnoe cinkovanie uluchshaemyh i pruzhinnyh stalej* [Thermodiffusion galvanizing of improved and spring steels] / I. A. Bulojchik // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy.* – 2013. – No. 4. – P. 121–124.

5. **Song, G. M.** Characterization of the failure behaviour of zinc coating on dual phase steel under tensile deformation, 2011 *Mat. Sci. Eng. A-Struct.* 528(21). – P. 6432–6437.

6. **Lur'e, A. I.** *Theory of elasticity* / A. I. Lur'e ; A. I. Lurie ; transl. by A. Belyaev. – Berlin [etc.] : Springer, 2005. – 1050 p.

7. **CHemodurov, V. T.** *Raschet mnogoslojnoj plastiny s privedennoj zhestkost'yu* [Calculation of a multilayer plate with reduced stiffness] / V. T. CHemodurov, P. M. Kancerov // *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and industrial safety.* – 2012. – No. 42. – P. 18–25.

8. **Timoshenko, S. P.** *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity] / S. P. Timoshenko– Moscow: Nauka Publ., 1975. – 620 p.

**9. Konstantinov, V. M.** *Issledovanie osobennostej struktury i svojstv termodiffuzionnyh zharostojkih pokrytij na medi* [Study of structural features and properties of thermal diffusion heat-resistant coatings on copper] / V. M. Konstantinov, V. G. Dashkevich, I. V. Pletenev // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2021. – No. 1 – P. 124–129.

*Поступила 25.11.2022*  
*Received 25.11.2022*