

**Исследование свойств покрытий TiAlN на борированных  
стальных подложках методом наноиндентирования**

Студент гр. 10401116 Лешок В. А.  
Научный руководитель – Ковальчук А.В.  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск

В данной работе проанализированы экспериментальные данные, полученные в результате динамического наноиндентирования, и установлена ранее неизвестная особенность, заключающаяся в том, что нанотвердость покрытий TiAlN на стальных подложках с термодиффузионными слоями значительно выше, чем на неупрочненных стальных подложках [1–4]. Результаты наноиндентирования покрытий представлены в таблице 1.

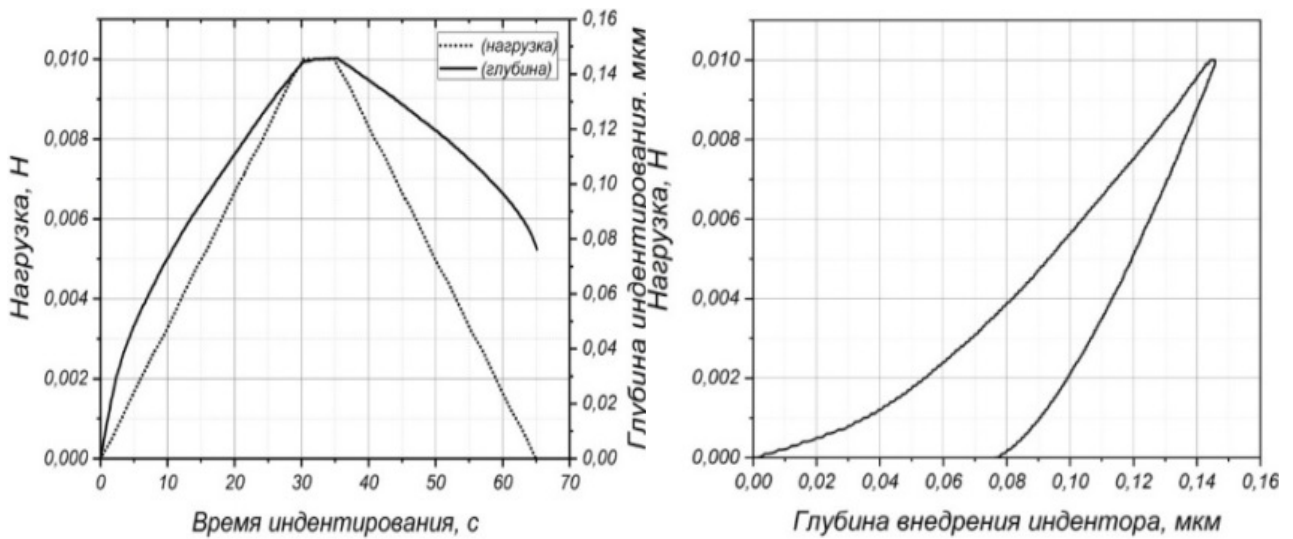
Таблица 1 – Результаты динамического наноиндентирования покрытий TiAlN, осажденных на стальные подложки с диффузионным слоем [1-2]

Обработка под- ложки	$F_{\max}$ , Н	$h_{\max}$ , мкм	$H_{IT}$ , Па	$E_{IT}$ , ГПа	$S$ , Н/мкм	$H/E^*$	$H^2/E^*$ , ГПа	$H^3/E^{*2}$ , ГПа
Отжиг	0,01	0,15	31,77	382,31	0,20	0,076	2,402	0,182
Однофазное бориро- вание	0,01	0,14	36,00	521,90	0,23	0,063	2,260	0,142
двухфазное бориро- вание	0,01	0,11	57,32	693,20	0,22	0,075	4,313	0,325

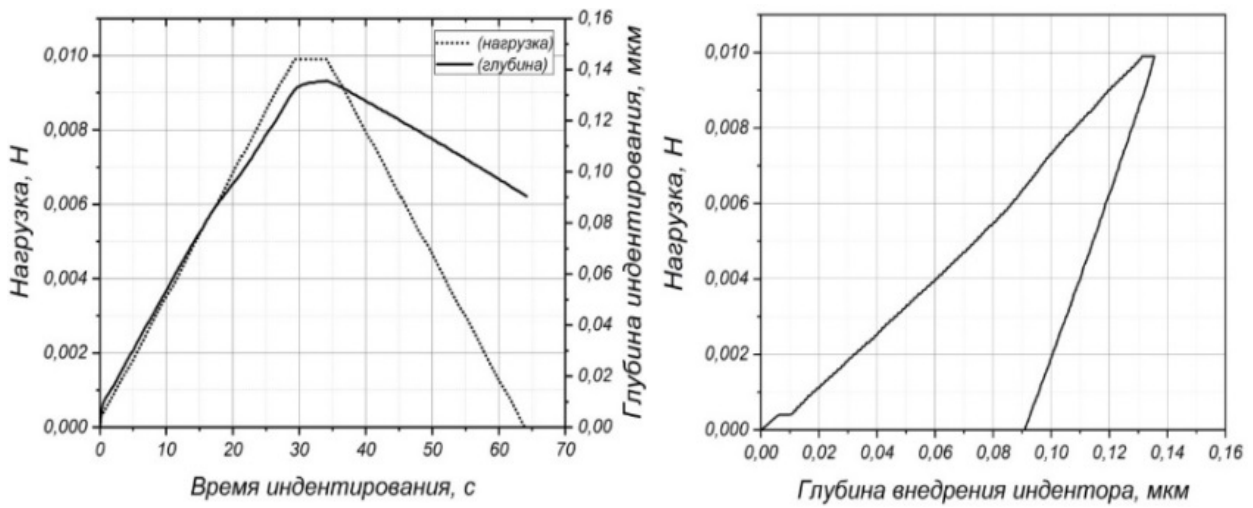
$F_{\max}$  – максимальная нагрузка при испытании, Н;  $h_{\max}$  – максимальная глубина вдавливания индентора, мкм;  $H_{IT}$  – нанотвердость, ГПа;  $E_{IT}$  – модуль упругости, ГПа;  $E^*$  – приведенный модуль упругости, ГПа;  $S$  – жесткость, Н/мкм;  $H/E^*$  – индекс пластичности;  $H^2/E^*$  – показатель упругого восстановления, ГПа;  $H^3/E^{*2}$  – показатель сопротивления пластической деформации, ГПа.

Следует, что предварительное упрочнение борированием стальной подложки приводит к повышению фактически измеренной нанотвердости поверхности с покрытием  $H_{IT}$  – до 1,8 раза, модуля упругости  $E$  – до 1,8 раза, показателя упругого восстановления  $H^2/E^*$  – до 1,8 раза, показателя сопротивления пластической деформации  $H^3/E^{*2}$  – до 1,8, повышению жесткости поверхности до 10 % при сохранении или повышении до 8 % индекса пластичности  $H/E$  по сравнению с характеристиками, полученными при наноиндентировании покрытия TiAlN на неупрочненной стальной подложке. Увеличение вязкости разрушения при этом составило более 4 раз [1].

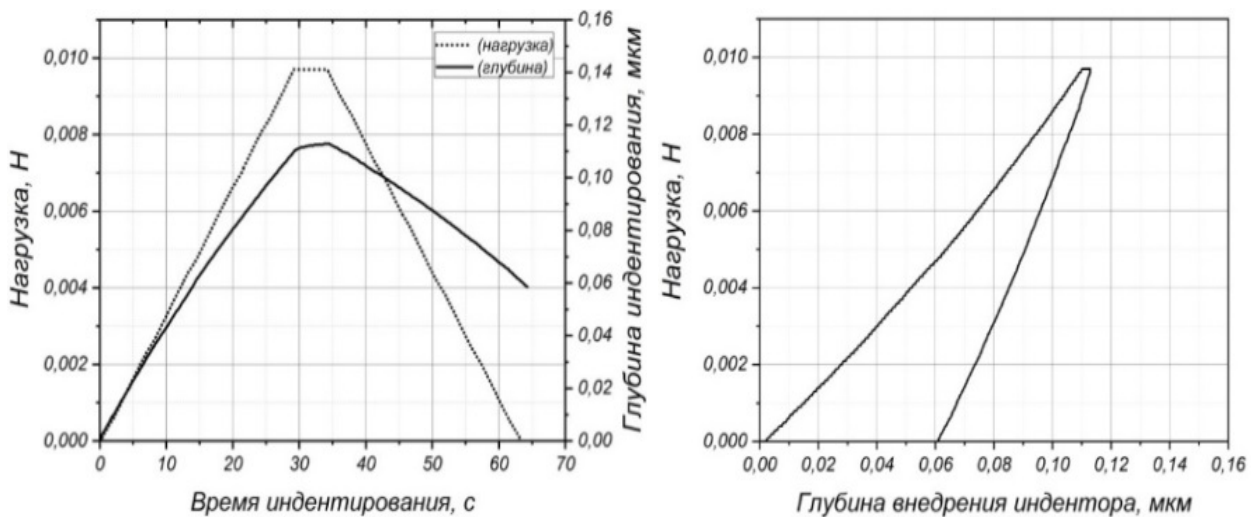
Экспериментально подтвержден тот факт [1–2], что термодиффузионное упрочнение стальной подложки и формирование двухслойной композиции «термодиффузионный слой – покрытие TiAlN» существенно меняет угол наклона разгрузочной кривой. А именно, делает его меньше. Этот факт подтверждает присутствие высоких упругих свойств покрытия и его, главным образом, вязкий характер разрушения под действием нагрузки индентора (рисунок 1).



а) отожженная подложка



б) подложка с однофазным боридным слоем



в) подложка с двухфазным боридным слоем

Рисунок 1 - Кривые нагружения-разгрузки, полученные при наноиндентировании с нагрузкой 0,01 Н покрытия TiAlN на стали У8А, подвергнутой различным видам обработки [1–2]

Можно утверждать, что образцы, подвергнутые нанесению покрытия TiAlN на подложку с твердым термодиффузионным слоем, обладают более высокой несущей способностью, по сравнению с образцами с подложкой из отожженной стали. Обнаруженный эффект тем выше, чем меньше градиент нанотвердости на границе покрытие-подложка [1–3, 8].

Можно сделать предположение, что композиционные покрытия «диффузионный слой – TiAlN» будут иметь повышенную стойкость к ударным нагрузкам, ударную вязкость и трещиностойкость [1, 5–9].

Экспериментально показано, что при предварительном упрочнении в виде ХТО стальной подложки происходит увеличение нанотвердости, модуля упругости, жесткости поверхности с покрытием TiAlN. По данным работ [1–3, 7] это происходит из-за формирования протяженного упрочненного подслоя, который снижает градиент твердости материалов и вносит вклад в упругое восстановление покрытия [1–3, 6].

Таким образом, подложка оказывает существенное влияние на упругое восстановление покрытия и измеряемые нанотвердость и модуль упругости поверхности с покрытием. Так, значения нанотвердости и модуля упругости покрытия TiAlN на подложке с двухфазным боридным слоем составляют соответственно 57,3 и 693,2 ГПа, по сравнению с нанотвердостью и модулем упругости покрытия на отожженной подложке, равными 31,77 и 382,31 ГПа [1–4].

#### Список использованных источников

1. Ковальчук, А. В. Методический подход к созданию топокомпозита триботехнического назначения «сталь – PVD покрытие» / А. В. Ковальчук, Г. А. Ткаченко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов: в 3 кн. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. – Книга 1. – С. 164–174.

2. Константинов, В.М. Свойства двухслойных износостойких покрытий «термодиффузионный слой – TiAlN» на сталях / В.М. Константинов, А.В. Ковальчук, В.Г. Дашкевич // Журнал физики и инженерии поверхности, 2016. – Т. 1 – № 2. – С. 213–224.

3. Komarov F.F. The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings / F.F. Komarov, V.M. Konstantinov, A.V. Kovalchuk, S.V. Konstantinov, H.A. Tkachenko // Wear. – 2016. – Vol. 352–353. – P. 92–101.

4. Способ получения износостойкого покрытия: пат. 20986 Респ. Беларусь, МПК С 23 С 14/35 / В.М. Константинов, Ф.Ф. Комаров, Г.А. Ткаченко, А.В. Ковальчук, В.В. Пилько, С.В. Константинов; заявитель Белорусский национальный технический ун-т. – № а 20131487; заявл. 11.12.13; опубл. 30.04.17 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 2 (115). – С. 92.

5. Nanostructured Coatings / Eds. A. Gavaleiro, J.T. De Hosson. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 648 p.

6. Hausner, H.H. Coatings of High-Temperature Materials / H.H. Hausner – New York: Springer Science & Business Media, 2013. – 296 p.

7. Komarov, F.F. Formation of nanostructured TiAlN, TiCrN, and TiSiN coatings using reactive magnetron sputtering / F.F. Komarov, S.V. Konstantinov, V.V. Pilko // Journal of Friction and Wear, 2014. – V. 35. – P. 215–223.

8. S.-Y. Lin, S.-Y. Chang, Y.-C. Huang, F.-S. Shieu, and J.-W. Yeh, “Mechanical performance and nanoindenting deformation of (AlCrTaTiZr)NCy multi-component coatings co-sputtered with bias” Surface and Coatings Technology, vol. 206, no. 24, pp. 5096–5102, 2012.

9. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий А.Д. Погребняк [и др.] // Успехи физических наук, 2009. № 1 (179). – С. 35–64.

10. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий В.Г. Завадский [и др.] // Физика наука материи, 2010. № 1 (210). – С. 45–48.