

УДК 669.007:621.73

І.В. Дощечкіна, канд. техн. наук  
Н.О. Лалазарова, канд. техн. наук  
О.Г. Попова, канд. техн. наук  
І.С. Татаркіна

## **ІОНО – ПЛАЗМОВА ОБРОБКА ПОВЕРХНІ ЯК СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИРОБІВ У ЦІЛОМУ**

Найбільш ефективним способом підвищення пластичності при збереженні високої міцності та в'язкості руйнування ( тобто конструкційної міцності ) є обробка на ультрадрібне зерно, переважно з нанокристалічною будовою.

Одержання нанорозмірної структури в об'ємі деталі можна досягти використанням або дуже великих ступенів пластичної деформації (рівноканальне кутове пресування, кручення під високим тиском), або методом порошкової металургії ( ПМ ). Перші способи потребують складного та дорогого обладнання і, головне, можна отримати лише малі за розмірами заготовки ( $d \sim 50$  мм і  $l \sim 200$  мм). Важливим питанням є також збереження зміцнення, досягнутого в процесі виготовлення виробу, при подальшій обробці, оскільки такі матеріали є дуже нерівноважними, а вироби, як правило, потребують термічної обробки. При використанні ПМ суттєвою проблемою є залишкова пористість.

Значно простіше отримати субмікрокристалічні структури та наноструктури не в усьому об'ємі виробу, а тільки на його поверхні.

У наш час поверхневий шар виробів розглядають як самостійну підсистему, яка докорінно впливає на поведінку виробу в процесі деформації та на формування його властивостей. У зв'язку з цим обробка матеріалу для одержання своєрідного композита за рахунок створення нанорозмірного поверхневого шару є інноваційним і актуальним напрямом.

У роботах [1, 2] показано, що саме поверхня відіграє значну роль у характері, місці і часі деформування та руйнування твердого тіла.

Стан поверхні можна змінити різними способами: поверхневим гартуванням, хіміко-термічною і іонно-плазмовою обробкою (ІПО) та ін.

У сучасній промисловості широко використовується нанесення на поверхню виробів іонно-плазмових покриттів різного складу з метою зміни спеціальних властивостей саме поверхневих шарів (зносостійкості, коефіцієнта тертя, корозійної стійкості, опору втомі тощо). Особливістю таких покриттів є нанокристалічна структура поверхневого шару [3,4] і саме з нею пов'язують високі експлуатаційні характеристики після ІПО.

Технологія ІПО ( метод КІБ ) складається з двох стадій: іонне бомбардування (ІБ) та нанесення покриття. При цьому ІБ є обов'язковою попередньою допоміжною операцією, призначеною для очищення поверхні та поліпшення адгезії покриття з основним металом. Однак відомо, що поверхнєве ІБ само по собі суттєво впливає на шорсткість і тонку струк-

туру поверхневого шару, його напружений стан, а всі ці фактори визначають поведінку виробу під навантаженням. Так, у роботі [5] було показано, що ІБ зміцнює виріб без зниження пластичності. Подальше нанесення покриття підвищує міцність не більше як на 3...4 %. Отже, ІБ можна розглядати як самостійну обробку, що радикально впливає на властивості виробу.

У даній роботі ставилася мета дослідити вплив іонного бомбардування на деформаційну поведінку і механічні властивості масивних зразків із низьковуглецевих сталей при випробуванні на розтяг.

Дослідженню підлягали стандартні циліндричні зразки ( $l_0 = 50$  мм,  $d = 10$  мм) зі сталі 20. Зразки після відпалу піддавалися іонному бомбардуванню низько енергетичними іонами титану ( $\sim 1,5$  кеВ) в середовищі аргону на установці «Булат-3». Випробування на розтяг проводилися на розривній машині UIT-STM-50 згідно з існуючим стандартом. Мікроструктура вивчалася на оптичному мікроскопі MicroMet-I-102BD та електронному мікроскопі REM-106 SELMI. Мікротвердість вимірювалася на твердомірі мікро-Віккерс UIT-HV micro-1 у діапазоні навантажень 0,01...2 кгс (0,098...19,6 Н). Нанотвердість визначалася на нанотвердомірі Nanoindenter (MTS Systems Corporation, Oak Ridge, USA) індентором Берковича. Для оцінювання нанотвердості було використано методику ХНА-ДУ, де поверхнева твердість визначається як відношення навантаження до площі втиснутої частини індентора, що дозволило визначити твердість за усією глибиною модифікованого поверхневого шару [6].

Криві розтягання після різних обробок поверхні зразків показано на рис.1. Механічні властивості узагальнені у табл.1.

Як свідчить рис.1, характер кривих після відпалу (крива 1) та після наступного ІБ (крива 2) практично однаковий. Відрізняються вони лише положенням: після ІБ крива 2 розташована вище, що свідчить про підвищення опору деформації та руйнуванню. При цьому абсолютне подовження зразків під навантаженням однакове і достатньо велике.

Таблиця 1 – Результати випробувань циліндричних зразків при розтяганні

Стан	$\sigma_s$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$S_k$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Відпал	440	230	1050	30	60
Відпал + ІБ	510	290	1150	30	65
Відпал + ІБ + шліфування	440	235	1000	30	61

З табл.1 видно, що ІБ на 16 % підвищує  $\sigma_s$  і на 26 % –  $\sigma_{0,2}$ . При цьому показники пластичності  $\delta$  та  $\psi$  залишаються практично незмінними на тому ж високому рівні. Підвищується майже на 100 МПа дійсний опір руйнуванню  $S_k$ .

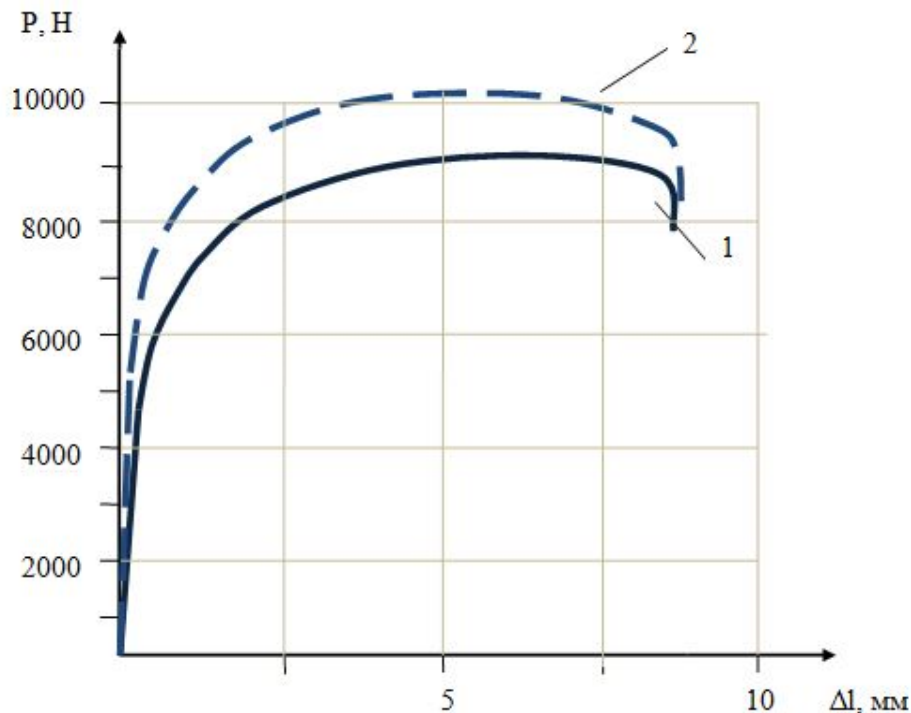


Рисунок 1 – Криві розтягання циліндричних зразків  $d = 10 \text{ мм}$  зі сталі 20:  
1 – відпал; 2 – відпал + ІБ

Отримані результати свідчать, що ІБ поверхні помітно підвищує показники міцності і при цьому зменшує вірогідність крихкого руйнування, оскільки зберігаються високими показник  $S_k$  і характеристики пластичності.

Частина зразків після ІБ була прошліфрована на глибину 0,5 мм для виявлення впливу структурних змін під модифікованим поверхневим шаром на механічні властивості. Але, як свідчить табл.1, шліфування призвело до зниження показників міцності практично до рівня вихідного стану (після відпалу). Цей факт підтверджує, що саме ІБ тонкого поверхневого шару вплинуло на поведінку зразків при розтяганні та зміну їх властивостей.

За результатами кривих наноіндентування визначено числові значення нанотвердості на різній глибині поверхні, які наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення нанотвердості сталі 20 після різної обробки

Стан	Нанотвердість, ГПа	
	глибина 200 нм	глибина 500 нм
До ІБ	2,63	2,32
Після ІБ	3,1	2,39

Для визначення нанотвердості після ІБ на глибині менше 200 нм, тобто на самій поверхні, було використано метод розрахунку середнього контактного тиску для кожної точки кінетичної діаграми навантаження. Результати свідчать, що на глибині до 4 нм нанотвердість дорівнює  $\sim 11$  ГПа, потім знижується до 5 ГПа на глибині 20 – 24 нм, а на глибині 100 – 120 нм досягає рівня  $\sim 3,5$  ГПа. Таким чином, результати наноіндентування підтверджують, що ІБ приводить до зміни тільки тонкого поверхневого шару.

Для виявлення причин формування такого унікального комплексу (поєднання високої міцності та пластичності) властивостей виробу після поверхневого ІБ було проведено мікроструктурні дослідження. Мікроструктура вивчалася при збільшеннях від 300 до 8000 крат. При відносно невеликих оптичних збільшеннях (до 1000) помітних змін мікроструктури не спостерігалось. При збільшенні у 8000 разів (рис. 2, б) виявилось значне подрібнення зерен у дуже тонкому ( $< 1$  мкм) поверхневому шарі.

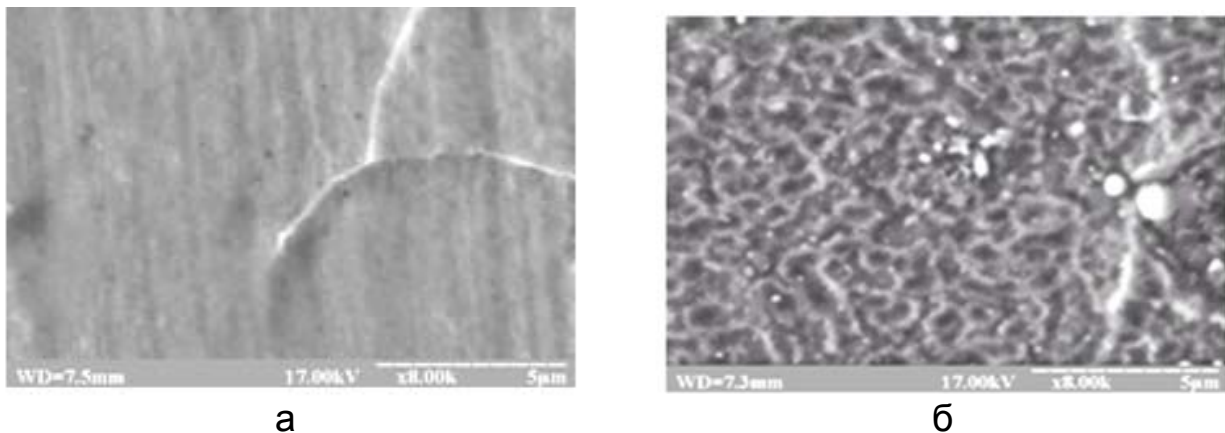


Рисунок 2 – Мікроструктура сталі 20: відпал (а); відпал + ІБ (б);  $\times 8000$

Так, середній розмір зерна до ІБ був 40 мкм, а після ІБ – зменшився до 200 нм. У середині зерна з'являється розвинена субструктура з чіткими міжзеренними границями, ширина яких дорівнює 115–180 нм. Така тонка структура характерна для субмікро- та нанокристалічного стану металу. У тілі ультрадрібних зерен відсутні дислокації. На границях (згідно з літературними джерелами) існує величезна кількість вакансій. Міцність матеріалу забезпечується бездефектною структурою в середині зерен, а пластичність – станом границь з великою кількістю точкових дефектів.

У таких матеріалах під впливом зовнішнього навантаження не може бути реалізований класичний дислокаційний механізм пластичної деформації. В них пластична деформація здійснюється за ротаційним механізмом – шляхом проковзування та повороту зерен. При цьому неможливе утворення концентраторів напружень і пов'язане з ним окрихчення металу. Крім того, має місце заліковування дефектів у поверхневому шарі.

## Висновки

1. Поверхнєве ІБ при випробуванні зразків на розтяг на 16 % підвищує  $\sigma_b$  і на 26 % –  $\sigma_{0,2}$ . При цьому залишаються на високому рівні показники пластичності  $\delta$  та  $\psi$ . Підвищується майже на 100 МПа дійсний опір руйнуванню  $S_k$ .

2. ІБ не зміцнює метал в середині виробу. Воно впливає тільки на його поведінку під навантаженням, що в результаті спричиняє зміни його властивостей у цілому.

3. Ефект підвищення конструктивної міцності виробу обумовлено двома процесами – залікуванням поверхневих дефектів та формуванням поверхневого нанокристалічного шару, в якому пластична деформація здійснюється за ротаційним механізмом. Це унеможлиблює утворення концентраторів напружень при деформації і пов'язане з ним окрищення.

### Список використаних джерел

1. Алехин, В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В. П. Алехин. – М.: Наука, 1983. – 280 с.

2. Баранов, Ю. В. Эффект А. Ф. Иоффе на металлах / Ю.В. Баранов. – М.: МГУИ, 2005. – 141 с.

3. Головин, Ю.И. Введение в нанотехнику / Ю.И. Головин. – М.: Машиностроение, 2007. – 496 с.

4. Андриевский, Р.А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: Академия, 2005. – 192 с.

5. Вплив поверхневого зміцнення на механічні властивості виробів / І.В. Дощечкіна, С.С. Дяченко, І.В. Пономаренко та ін. // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – Х.: ХНАДУ, 2005. – Вып. 16. – С.79-82.

6. Современные методики определения макро-, микро- и нанотвёрдости материалов / В.И. Мощенок, Н.А. Лалазарова, М.М. Ляховицкий, И.Е.Кухарева, В.А. Скрыпников // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. научн. трудов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2010. – Вып. 1 (61). – С.97–100.

*Поступила в редакцию 11.02.2015.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Е. Тараненко,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*