

## ФАКТОРИ, ЩО ЗУМОВЛЮЮТЬ ПІДВИЩЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ПІСЛЯ ІОННО-ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ

С.С. Дяченко, І.В. Пономаренко

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
вул. Петровського, 25, м. Харків, 61002*

**Анотація.** На підставі механічних (статичних, циклічних) випробувань встановлено, що тонкий поверхневий шар модифікованої структури після іонно-плазмової обробки (ІПО) виробу істотно (до 40 %) підвищує його конструкційну міцність загалом. Головну роль в цьому ефекті відіграє перша стадія ІПО – іонне бомбардування (ІБ), яке забезпечує майже 85 % загального зміцнення без втрати пластичності. В роботі проаналізовано фактори, які можуть зумовити цей результат (шорсткість поверхні і форма профілю, тонка структура, внутрішні напруження, мікро- та нанотвердість) й оцінена значущість кожного з них. Підвищення конструкційної міцності пояснено заліковуванням поверхневих дефектів та створенням нанокристалічної структури під час ІБ, наслідком чого є реалізація механізму надпластичності в поверхневому шарі.

**Ключові слова:** конструкційна міцність, мікро- і нанотвердість, шорсткість поверхні, тонка структура, внутрішні напруження, наноструктура, заліковування дефектів, надпластичність.

### Вступ

Надійність виробу залежить від багатьох чинників (матеріалу, технології виготовлення, зміцнювальної обробки, умов експлуатації тощо). Удосконалення чи покращання кожної складової повинно сприяти підвищенню якості виробу, а отже, і його надійності. Як відомо, надійність виробу закладається на стадії його проектування, забезпечується на стадії виготовлення і реалізується при експлуатації. Отже, вплив конструктора і технолога на якість виробу може бути реалізований на перших двох стадіях. Саме тому правильний вибір матеріалу і його обробки такі важливі з погляду якості виробу, узагальненим показником якої є конструкційна міцність (КМ) матеріалу. Сьогодні найперспективнішим напрямом підвищення КМ металів та їх сплавів є отримання ультрадрібного зерна з розвиненою субструктурою комірчастого типу [1, 2]. Ще вищу КМ можна реалізувати при переході розміру зерна в нанометровий діапазон. Однак отримати нанокристалічну структуру в масивному виробі технологічно дуже складно.

Відомо, що використання іонно-плазмової обробки забезпечує створення нанокристалічної структури в тонкому поверхневому шарі матеріалів [3, 4]. Оскільки здебільшого руйнування виробу відбувається саме з поверхні, логічно припустити, що використання ІПО може знизити схильність матеріалу деталі до руйнування при її експлуатації, тобто підвищити конструкційну міцність.

### Мета дослідження

Метою дослідження є встановлення факторів, які викликають підвищення конструкційної міцності сталевих виробів після ІПО, і визначення їх значущості.

### Матеріал і методика дослідження

Для дослідження були вибрані маловуглецеві конструкційні сталі 18ХГТ та 20Х, які широко використовуються в сучасному машинобудуванні. З них виготовляли зразки різних типів залежно від виду випробувань. Для випробувань на розтяг використовували циліндричні зразки діаметром 5 і 10 мм, довжиною робочої частини 25 та 50 мм відповідно (ГОСТ 1497-84); випробування на втому

здійснювали на циліндричних зразках діаметром 7,5 мм, довжиною 23 мм (ДСТУ 2413-94); визначення мікро- та нанотвердості сталей здійснювали на циліндричних зразках діаметром 12 мм і висотою 7 мм.

Вихідною термообробкою було покращання (гартування з високим відпуском). Потім зразки піддавали ІПО на установці “ННВ-66-І1” за режимами, наведеними в роботі [5]. ІПО включала ІБ та нанесення покриття нітриду титану (TiN). У зразках для випробувань на розтяг та втому обробляли безпосередньо робочу частину і головки, в циліндричних плоских зразках – торцеву поверхню. Розкид значень механічних властивостей оцінювали через середньоквадратичне відхилення  $S$ .

Для аналізу ролі шорсткості при випробуваннях на розтяг одну частину зразків піддавали шліфуванню, другу – поліруванню. Робочу поверхню зразків на втому за вимогами стандартів на механічні випробування попередньо полірували. Мікротвердість вимірювали на приборі ПМТ-3 при навантаженні 50 г.

Визначення нанотвердості  $H_n$  здійснювали на приладі “Nano Indentor II” фірми “МТС Systems” при навантаженні 5 г індентором Берковича.

Шорсткість і профіль поверхні визначали профілографом-профілометром TR-200.

Тонку структуру поверхні вивчали за допомогою дифрактометра ДРОН-3 у випромінюванні  $K_{\alpha}$ -Cr при нормальній температурі. При визначенні розмірів ОКР та мікронапружень  $\sigma_{II}$  порівнювали ширину ліній (110) та (211), апроксимацію профілю дифракційних ліній здійснювали з використанням функції Гаусса. Для вимірювання  $\sigma_I$  застосовували  $\sin^2\psi$ -метод. Густина дислокацій  $\rho$  оцінювали за шириною рентгенівської лінії.

### Підвищення конструкційної міцності сталей після ІПО

**Статичні випробування.** Криві розтягання для зразків сталі 18ХГТ діаметром 5 мм після різної обробки наведено на рис. 1. Для зразків діаметром 10 мм сталі 18ХГТ та 5 мм сталі 20Х результати якісно не відрізняються, тому нижче наводяться дані тільки для сталі 18ХГТ.

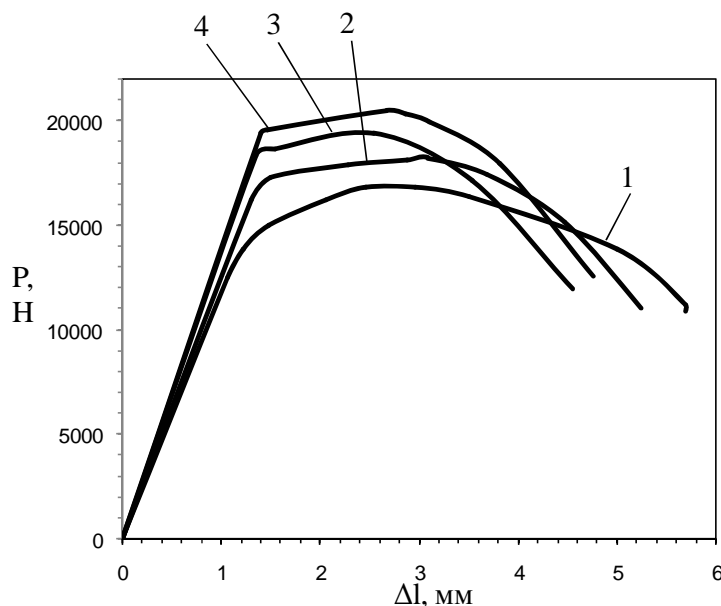


Рис. 1. Криві розтягання сталі 18ХГТ після різної обробки:  
 1 – гартування з високим відпуском (Г+ВВ), шліфування; 2 – Г+ВВ, полірування;  
 3 – Г+ВВ+ІБ; 4 – Г+ВВ+ІБ+TiN (3, 4 – попереднє шліфування)

З рисунка видно, що перехід від шліфованих зразків до полірованих підвищує опір пластичному деформуванню і руйнуванню (кр. 1 і 2). Ще більший вплив чинять ІБ та подальше нанесення покриття TiN. Але у всіх випадках матеріал веде себе пластично.

Розраховані за цими кривими значення механічних характеристик наведено у табл. 1.

З таблиці видно, що полірування підвищує тимчасовий опір  $\sigma_b$  на 9 %, умовну границю текучості  $\sigma_{0,2}$  – на 22 %, але при цьому зростає розкид значень  $\sigma_b$ , хоча для  $\sigma_{0,2}$  він залишається практично на тому самому рівні.

Після ІБ  $\sigma_b$  збільшується на 17 %,  $\sigma_{0,2}$  – на 34 % порівняно зі шліфованими зразками і на 7 та 10 % відповідно порівняно з полірованими. Це супроводжується істотним зменшенням розкиду їх значень, особливо для границі текучості. При цьому, як і при механічному наклепі під час полірування, границя текучості підвищується інтенсивніше ніж  $\sigma_b$ . Так,  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  після шліфування становить 0,84, після полірування – 0,94, після ІБ – 0,96. Подальше нанесення покриття незначно підвищує міцність – на 4–5 %, тоді як  $S$  помітно зростає. Особливо треба підкреслити, що при такому значному зміцненні (до 40 %) показники пластичності практично не змінюються, відносне звуження  $\psi$  має навіть тенденцію до збільшення.

Таблиця 1

**Механічні властивості, розкид їхніх значень  $S$  та шорсткість поверхні сталі 18ХГТ після різної обробки**

Обробка поверхні	Механічні властивості													Ra, мкм
	$\sigma_b$ , МПа	$S$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$S$ , МПа	$\delta_5$ , %	$S$ , %	$\psi$ , %	$S$ , %	$\sigma_{-1}$ , МПа	$H_{50}$ , ГПа	$h_{50}^*$ , мкм	$H_H^*$ , ГПа	$h_H^*$ , мкм	
Г+ВВ (шліф.)	854	13	717	28	18	1	64	0,1	–	–	–	–	–	0,49
Г+ВВ (полір.)	934	24	875	26	16	1	64	0,9	405	2,73	2,6	4,74	0,67	0,12
Г+ВВ+ІБ	1003	10	962	13	15	0,4	67	0,4	430	3,16	2,4	5,43	0,61	0,17
Г+ВВ+TiN	1056	31	1007	33	16	0,6	67	0,6	460	3,85	2,2	5,92	0,50	0,45

\* $H_H$  – нанотвердість;  $h_{50}$  і  $h_H$  – глибина проникнення індентора при визначенні мікро- та нанотвердості відповідно.

**Циклічні випробування.** Аналіз кривих втоми показав, що іонне бомбардування, здійснене після покращання, підвищує границю витривалості на 6 %, а після нанесення покриття TiN  $\sigma_{-1}$  зростає на ~ 13 % порівняно з покращаним станом, тобто покриття додатково збільшує опір втоми на 7 %. Це значно менше ніж підвищення статичної міцності, але водночас знижується розкид значень  $\sigma_{-1}$ , що, безумовно, є позитивним, враховуючи статистичну природу опору втоми і його високу чутливість до стану поверхні.

**Дослідження можливих факторів, що зумовлюють зростання конструкційної міцності при ПЮ**

Виходячи із загальних позицій сучасного матеріалознавства, підвищення конструкційної міцності за рахунок використання ПЮ може бути пов'язане з цілою низкою факторів: зменшенням шорсткості поверхні, виникненням макронапружень стиску (напружень першого роду  $\sigma_I$ ), зміною тонкої структури поверхневого шару (подрібненням областей когерентного розсіювання, ростом напружень другого роду  $\sigma_{II}$  та густини дислокацій  $\rho$ ), значним зростанням твердості поверхневих шарів, заліковуванням поверхневих дефектів, утворенням нанокристалічної структури й особливостями її поведінки під час подальшої пластичної деформації тощо. Проаналізуємо значущість кожного з них.

**Шорсткість та профіль поверхні.** Як відомо, шорсткість та профіль поверхні значно впливають на експлуатаційні характеристики виробів (величину зносу спряжених поверхонь вузлів тертя, циклічну міцність, стійкість до корозії, герметичність тощо) [6]. Викладені вище результати свідчать, що шорсткість істотно впливає на характеристики міцності не тільки циклічних, але й при статичних випробуваннях – у полірованих зразків вона вища, ніж у шліфованих.

Іонне бомбардування по-різному впливає на шорсткість поверхні шліфованих і полірованих зразків: для шліфованих зразків шорсткість зменшилася з  $Ra = 0,49$  мкм до  $Ra = 0,18$  мкм, для полірованих вона дещо погіршилася (з  $Ra = 0,12$  мкм до  $Ra = 0,16$  мкм). Різниця у параметрах

шорсткості після ІБ для зразків з різною попередньою механічною обробкою (0,18 та 0,16 мкм) лежить у межах похибки вимірювань (10 %). Можна зробити висновок, що після іонного бомбардування як для шліфованих, так і для полірованих зразків формується практично однакова шорсткість  $Ra \sim 0,16\text{--}0,18$  мкм, характерна для цього режиму іонного бомбардування. Подальше нанесення покриття TiN веде до збільшення шорсткості, порівняно з ІБ (табл. 1). Зазвичай її пов'язують з наявністю в покритті мікрокрапель  $\alpha\text{-Ti}$ , що є наслідком розпилення титанового катода [7–9].

Профілограми поверхні зразків у вихідному стані та після ІПО наведено на рис. 2.

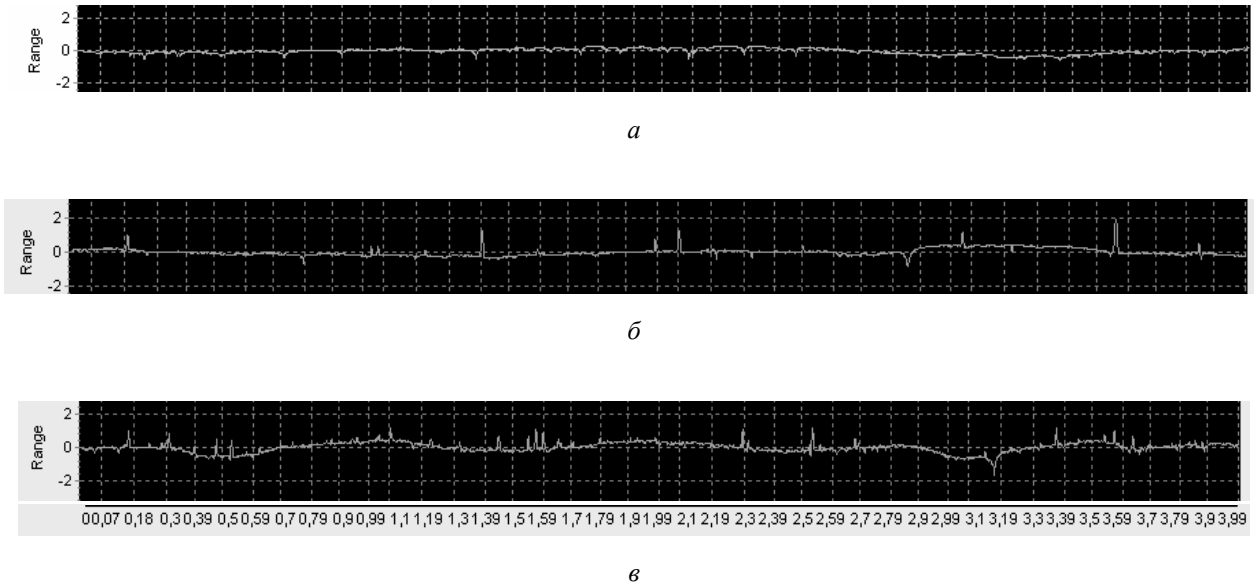


Рис. 2. Профілограми поверхні полірованих зразків:  
*a* –  $\Gamma+BB$ ; *б* –  $\Gamma+BB+IB$ ; *в* –  $\Gamma+BB+TiN$

Аналіз профілю зразків показав, що підвищення шорсткості після ІБ (рис. 2, б) і особливо після нанесення покриття (рис. 2, в) пов'язано, переважно, з появою локальних піків на поверхні. Порівняння їх величини з розміром мікрокрапель Ti, виявлених при металографічному дослідженні, підтверджує, що вони відповідають цим краплям.

Порівняння зміни шорсткості поверхні з механічними властивостями дає змогу зробити висновок, що сама по собі шорсткість, безумовно, дуже істотно впливає на показники міцності, і перехід від шліфування до полірування зразків дає змогу підвищити  $\sigma_b$  на 9 %, а  $\sigma_{0,2}$  – на 22 %. Але її не можна вважати визначальним фактором у підвищенні міцності при використанні ІПО. Так, після ІБ шорсткість, порівняно з полірованими зразками, збільшилася, а міцність підвищилася ( $\sigma_b$  на 7 %, а  $\sigma_{0,2}$  – на 10 %). Те саме можна сказати і відносно росту властивостей після нанесення покриття, коли  $Ra$  досягає значень, близьких до шліфованого зразка.

**Макронапруження та тонка структура поверхневого шару.** В роботі проаналізовано макронапруження першого роду  $\sigma_I$ , розмір областей когерентного розсіювання ОКР, мікрореформації, а отже, напруження другого роду  $\sigma_{II}$ , густина дислокацій  $\rho$  після кожної операції поверхневої обробки і зроблена спроба оцінити внесок кожного фактора у підвищення конструкційної міцності. Результати рентгеноструктурного аналізу наведено у табл. 2.

З таблиці видно, що як просто механічна дія (полірування), так і ІПО викликають помітні зміни макронапружень та тонкої структури поверхневого шару зразка порівняно зі шліфуванням: подрібнюються ОКР, збільшується густина дислокацій, підвищуються напруження першого і другого родів.

**Результати рентгенівських досліджень  
покращеної сталі 18ХГТ після різної обробки поверхні**

Метод Обробки	$\beta_{110}$ , мрад	$\beta_{211}$ , мрад	L, нм	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\sigma_{II}$ , МПа	$\rho$ , см <sup>-2</sup>	$\sigma_I$ , МПа
Шліфування	0,8	7,6	380	0,40	80	$4,8 \cdot 10^8$	-20
Полірування	3,2	23,3	88	1,23	250	$5,8 \cdot 10^9$	-330
Шліфування + ІБ	2,7	31,7	103	1,67	340	$4,2 \cdot 10^9$	-150
Шліфування + ІБ+ TiN	2,7	19,8	103	1,04	210	-	-195

Дані цієї таблиці свідчать, що найбільші зміни реєструються після полірування: порівняно зі шліфуванням ОКР подрібнюються більш ніж у 4 рази, густина дислокацій підвищується на порядок, досягаються максимальні макронапруження стиску. Тільки мікронапруження дещо менші, ніж після ІБ.

Водночас найвищі показники міцності досягаються після ПЮ, причому 74 % загального зростання  $\sigma_v$  та 85 % підвищення  $\sigma_{0,2}$  забезпечуються на першій стадії ПЮ – після іонного бомбардування.

З наведених фактів можна зробити висновок, що вплив ІБ та покриття на властивості матеріалу не можна пояснити тільки проаналізованими чинниками.

**Мікро- та нанотвердість.** Як відомо, між міцністю і твердістю існує зв'язок – з підвищенням міцності зростає і твердість. Враховуючи великий вплив стану поверхні на поведінку тіла при деформуванні, було логічним порівняти зростання поверхневої твердості з приростом міцності.

З табл. 1 видно, що після ІБ мікротвердість поверхні  $H_{50}$  підвищується ~ на 16 %, тоді як границя текучості – на 34 %, тобто, на нашу думку, і цей фактор не є головним. Природно, що покриття ще більше її підвищує.

Як вже відзначалося, нині вважається встановленим формування під впливом ПЮ наноструктурного шару, товщина якого може бути значно меншою від глибини проникнення індентора при вимірюванні мікротвердості  $H_{50}$  (табл. 1). В наших дослідженнях визначений рентгенівським методом розмір ОКР після ІБ дорівнює ~ 100 нм. Але ці дані також є усередненими по глибині напівпоглинаючого шару (~ 8мкм). Тому для характеристики властивостей саме поверхневого нанокристалічного шару був використаний метод вимірювання нанотвердості, який дає змогу оцінити цю характеристику на дуже малих глибинах [10].

Нанотвердість визначають, обробляючи діаграми навантаження досліджуваних матеріалів. На рис. 3 наведено такі діаграми для сталі 18ХГТ у вихідному стані (кр.1) та після різної обробки поверхні (кр. 2, 3).

З рисунка видно, що вигляд кривої 3 (для зразка з покриттям) відрізняється від інших кривих – вона зростає крутіше. Це характеризує значно вищий опір проникненню індентора в покриття TiN з високою твердістю.

Після обробки наведених діаграм за методикою Олівера і Фара [11] були отримані величини нанотвердості  $H_n$ , наведені у табл. 1. Її значення, як і треба було чекати, істотно вищі, ніж мікротвердості через те, що на відміну від мікротвердості, вона визначається відношенням навантаження до площі горизонтальної проекції відбитка, а не самого відбитка, та за рахунок меншої глибини проникнення індентора.

Автори роботи [10] запропонували методику для розрахунку середнього контактного тиску (СКТ) для кожної точки діаграми навантаження, що за своєю фізичною сутністю є нанотвердістю. Це дає змогу побудувати залежність нанотвердості від величини навантаження, або глибини проникнення індентора. На рис. 4 (кр. 1) така залежність наведена для сталі 18ХГТ після покращання.

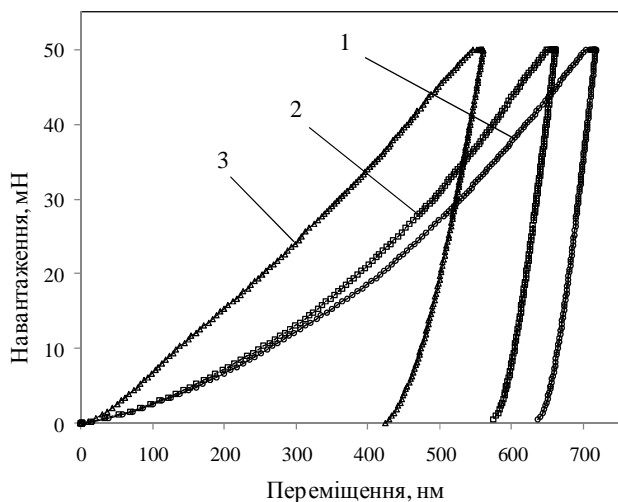


Рис. 3. Діаграми навантаження сталі 18ХГТ після різної обробки: 1 –  $\Gamma+BB$  (полірування); 2 –  $\Gamma+BB+ІБ$ ; 3 –  $\Gamma+BB+TiN$

З кривої видно, що в області малих навантажень реєструється аномально високе зростання нанотвердості. Автори роботи [10] пов'язують це, передусім, зі сферичним затупленням вершини індентора. На підставі порівняння розрахункової площі відбитка (для ідеально гострого індентора) з реальною, визначеною за допомогою атомно-силового мікроскопа, автори цієї роботи запропонували емпіричну формулу. Користуючись нею, була побудована крива 2, яка показує значно нижчу (майже в 4 рази) твердість поверхні. Підкреслимо, що йдеться про сталь в одному і тому самому стані – після покращання. Тому значне підвищення твердості в області малих навантажень – це інструментальний ефект, пов'язаний із затупленням індентора. З наведених даних випливає, що його неврахування може істотно спотворити результати і призвести до помилкових висновків.

На рис. 5 показана залежність нанотвердості від навантаження (переміщення) індентора для сталі 18ХГТ після різної обробки з урахуванням інструментального ефекту.

З аналізу цих кривих можна зробити такі висновки:

1 – підвищення (на ~ 55 %) поверхневої твердості у вихідному стані (кр. 1), зумовлене наклепом під час полірування зразка;

2 – ІБ (кр. 2) викликає додаткове збільшення твердості – майже на 13 %, а його вплив поширюється на глибину ~ 20–30 нм;

3 – після нанесення покриття товщиною ~ 1000 нм (кр. 3) твердість, порівняно з ІБ, збільшується в 1,5 рази, а глибина, на якій реєструється його наявність, більша за 700 нм (на цій глибині ще не досягається вихідна твердість).

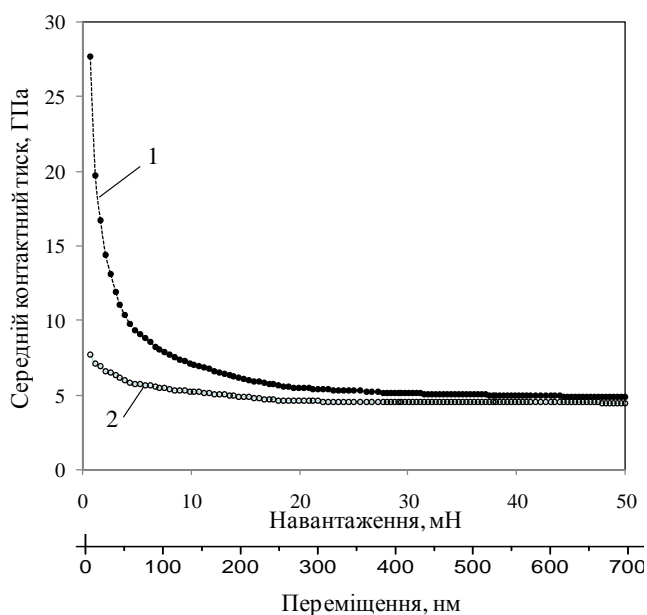


Рис. 4. Залежність СКТ (нанотвердості) від навантаження (переміщення індентора) для сталі 18ХГТ (покращання) без урахування (кр. 1) і з урахуванням (кр. 2) неточності форми індентора

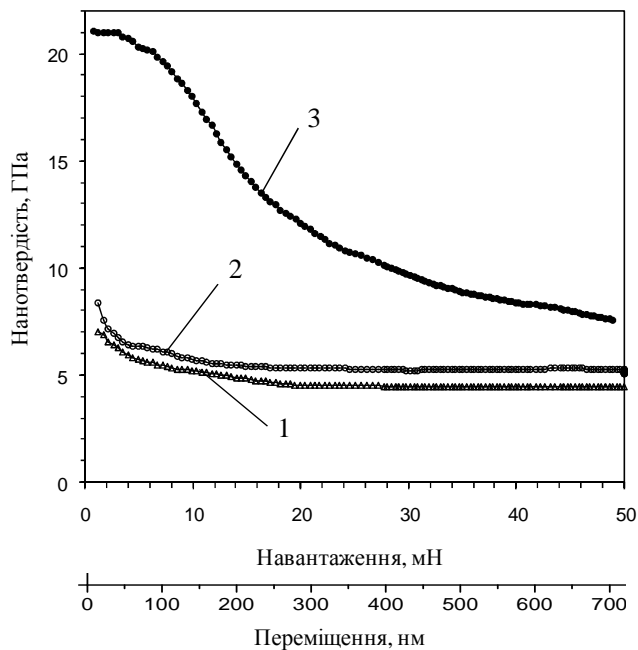


Рис. 5. Залежність нанотвердості від навантаження (переміщення індентора) для сталі 18ХГТ з урахуванням неточності форми індентора: 1 – Г+ВВ; 2 – Г+ВВ+ІБ; 3 – Г+ВВ+ TiN

Тепер порівняємо аналіз нанотвердості з результатами випробувань на розтяг. На наш погляд, їх не можна пояснити зміною твердості поверхневого шару. Так, найбільше її підвищення реєструють після нанесення покриття, а показники міцності при цьому збільшуються, порівняно з ІБ, всього на 4 %. Головну ж роль, як вже зазначалося, відіграє саме ІБ, завдяки якому забезпечується 85 % зміцнення. Це дає підставу вважати, що ІБ створює якісь специфічні зміни у поверхневому шарі, які їй відповідають за таке значне підвищення тимчасового опору і особливо границі текучості без падіння пластичності.

На наш погляд, цей результат можна пояснити заліковуванням при ІБ поверхневих дефектів, аналогічно ефекту А.Ф. Іоффе для кам'яної солі [12]. А.Ф. Іоффе випробовував на розтяг зразки кам'яної солі діаметром 6 мм у повітрі і у воді. При розтягуванні у повітрі зразки руйнувалися крихко, а границя міцності дорівнювала 5 МПа. Якщо ж розтягування здійснювалося у воді, кам'яна сіль ставала пластичною, діаметр у шийці зменшувався до 0,2 мм, тобто відносне звуження  $\psi$  сягало близько 99 % (!), а тимчасовий опір зростав до 1600 МПа, що близько до теоретичної міцності (за розрахунками для солі вона  $\sim 2000$  МПа). Причиною такої зміни властивостей, на думку акад. Іоффе, є заліковування дрібних поверхневих дефектів зразка за рахунок розчинювання солі у воді. Підтвердженням правильності цього припущення є те, що розтягування зразків у насиченому водному розчині кам'яної солі, коли розчинювання виключалося, не показало зростання міцності. Отже, незважаючи на тонкий поверхневий шар, який розчинювався в процесі випробувань, міцність усього зразка (за термінологією А.Ф. Іоффе “внутрішня міцність”) підвищилася близько до теоретичної одночасно із стовідсотковим зростанням пластичності.

Пізніше аналогічний ефект був отриманий Ю.В. Барановим при розтяганні металевих зразків у електроліті – йому вдалося деформувати вольфрам на 80–90 % у лужному середовищі. При цьому міцність підвищилася на 30 %. Цей результат був названий ефектом Іоффе для металів [13].

В обох описаних випадках процес розтягання зразків здійснювався у речовині, яка видаляла не тільки дефекти, що існували на поверхні зразка до початку випробувань, але й нові, які утворювалися безпосередньо під час розтягання – так званий дебрі-шар (скупчення дислокацій біля границь зерен, субзерен, поверхонь розділу фаз, неметалевих включень тощо).

В наших експериментах випробування здійснювалися у повітрі, тобто за відсутності середовища, яке могло б видалити пошкоджений під час деформації поверхневий шар. Однак зразок, незважаючи на велике зміцнення, залишався пластичним. На нашу думку, це можна пояснити саме поведінкою поверхневого наноструктурного шару.

Особливості структури нанокристалічних матеріалів (великий об'єм поверхні границь відносно об'єму самого наноструктурного елемента, зосередження дислокацій по границях за практичної відсутності в об'ємі наноелементів, висока концентрація вакансій на границях) сприяють при розтягуванні зразка зернограничному проковзуванню структурних елементів один відносно одного, аналогічно тому, як це відбувається при повзучості або надпластичності, тобто в наноструктурних матеріалах може змінюватися механізм пластичної деформації, в якому велику роль відіграє реалізація недислокаційної пластичності [15–16].

Зауважимо, що надпластичність, як відомо, реалізується в умовах малих швидкостей деформації і в певному інтервалі температур –  $(0,4-0,75)T_{пл}$ . Але для наноматеріалів, навпаки, схильність до утворення тріщин зменшується з підвищенням швидкості деформації [16], а температура переходу у надпластичний стан знижується [17].

Викладене теоретичне підґрунтя дає змогу запропонувати використання ІБ для підвищення показників міцності реальних виробів на 35–40 % без окрихчення матеріалу, яке зазвичай спостерігається за такого істотного зміцнення. Важливо також підкреслити, що така обробка зменшує розкид значень показників міцності, що підтверджує нашу думку про визначальну роль у її зростанні саме заліковування дефектів.

### Висновки

1. Конструкційна міцність виробу може бути підвищена використанням при кінцевій механічній обробці полірування замість шліфування. Під час такої обробки створюються значні напруження стиску, подрібнюються області когерентного розсіювання, істотно збільшується поверхнева твердість, наслідком чого є підвищення тимчасового опору на 9 %, а границі текучості – на 22 %.

2. Іонне бомбардування покращених шліфованих зразків підвищує тимчасовий опір при випробуваннях на розтяг на 17 %, а границю текучості – на 34 % без зниження пластичності і навіть за тенденції до збільшення відносного звуження. Нанесення покриття TiN незначно (на 4–5 %) підвищує показники міцності. Отже, головний внесок у зростання конструкційної міцності (~ 85 %) пов'язаний з процесами, що відбуваються саме при іонному бомбардуванні.

3. Така зміна властивостей не може бути зумовлена тільки впливом шорсткості поверхні, макро-напружень, тонкої структури та поверхневої твердості, оскільки після іонно-плазмової обробки:

- шорсткість збільшується порівняно з полірованим станом, а властивості зростають;
- найбільші зміни тонкої структури спостерігаються після полірування, а механічні властивості зростають менше ніж після ПО;
- найбільше підвищення нанотвердості реєструється після нанесення покриття, а міцність при цьому зростає, порівняно з ІБ, усього на 4–5 %.

4. Головною причиною підвищення конструкційної міцності після ПО може бути заліковування поверхневих дефектів та створення нанокристалічної структури під час ІБ і реалізація пластичної деформації за механізмом надпластичності.

### Література

1. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – Изд. второе, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
2. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. Посібник. – Харків: Вид. ХНАДУ, 2003. – 226 с.
3. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение, 2007. – 496 с.
4. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. – М.: Академия, 2005. – 192 с.
5. Конструкционная прочность стальных изделий с нанокристаллической структурой поверхности / И.В. Пономаренко, С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина // Вісті академії інженерних наук України. №3(30) / 2006. – С. 232–235.
6. Допуски и посадки: Справочник в 2-х ч. Ч. 1/ Под ред. В.Д. Мягкова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд., 1979. – 544 с.



7. Мацевитый В.М. Покрытия для режущих инструментов. – Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 128 с.
8. Покрытия на основе тугоплавких соединений, осаждаемых из потоков металлической плазмы вакуумной дуги / В.М. Береснев, В.Т. Толлок, В.И. Гриценко. Физическая инженерия поверхности. – 2003, Т. 1. – № 3–4. – С. 237–257.
9. Ионно-плазменное напыление износостойких покрытий на инструмент / П.А. Тополянский НПФ “Плазмацентр”, Санкт-Петербург, Россия, 2004, www.plasmacentre.ru
10. Дуб С.Н., Новиков Н.В. Испытания твердых тел на нанотвердость // Сверхтвердые материалы. № 6, 2004. – С. 16–33.
11. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. Oliver W.C., Pharr G.M. // J. Mater. Res. – 1992. – 7, N 6. – P. 1564–1583.
12. Иоффе А.Ф. Механические свойства кристаллов // Успехи физических наук. – Ленинград. – 1928. – Т. VIII. Вып. 4. – С. 441–482.
13. Баранов Ю.В. Эффект А.Ф. Иоффе на металлах. – М.: МГИУ, 2005. – 140 с.
14. Носкова Н.И., Милуков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. – Екатеринбург: УрОРАН, 2003. – 279 с.
15. Кинетические особенности деформации твердых тел в наномикрообъемах / Ю.И. Головин, С.Н. Дуб, В.И. Иволгин, В.В. Коренков, А.И. Тюрин // Физика твердого тела, 2005, Т. 47, Вып. 6. – С. 961–973.
16. Materials with ultrafine microstructures: Retrospectives and Perspectives Nanostuctured Materials. Gleiter H. // 1992, v. 1, P. 1–19.
17. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: полученные структура и свойства. – М.: Академкнига, 2007.

## FACTORS DETERMINING THE INCREASE OF STEEL ARTICLES STRUCTURAL STRENGTH AFTER ION-PLASMA TREATMENT

S.S. Djachenko, I.V. Ponomarenko

*Kharkiv National Automobile and Highway University,  
Petrovskogo st., 25, 61002, Kharkiv, Ukraine*

**Abstract.** *Mechanical (static, cyclic) testing proves that the thin surface layer of modified structure after ion-plasma treatment (IPT) of the article substantially (about 40 %) increases its structural strength as a hole. The first stage of IPT – the ion bombardment (IB) -plays a major role in this effect assuring about 85 % of total strengthening without ductility decrease. This work gives the analyses of factors which can cause such result (surface roughness and profile mode, internal stresses, fine structure, micro- and nanohardness) and the estimation of their importance. Structural strength increase is explained by surface defects healing and nanocrystalline structure formation during IB, the result of which is the realization of superplasticity mechanism of deformation in the surface layer.*

**Keywords:** *structural strength, hardness and nanohardness, surface roughness, internal stresses, fine structure, nanostructure, defects healing, superplasticity.*