

УДК 669.141.24

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0.97

РОЛЬ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА У ФОРМУВАННІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИРОБУ ПІД ВПЛИВОМ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ

Дощечкіна І. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Здійснено субмікроструктурування низькоенергетичним іонним бомбардуванням поверхневого шару й вивчено його вплив на деформаційну поведінку виробів у процесі розтягання. Установлено, що наявність тонкого модифікованого шару (за умови незмінної серцевини) істотно змінює властивості виробу в процесі силового впливу. Визначальна роль належить внеску поверхневого шару (масштабному фактору) – відношенню площі модифікованого шару до об'єму виробу: якщо воно менше за одиницю більшою мірою реалізується ефект зміцнення за умови збереження пластичності, а якщо більше за одиницю, виявляється значний ефект пластифікації в разі збереження (або навіть деякого збільшення) зміцнення.

Ключові слова: низьковуглецева сталь, стан поверхні, іонне бомбардування, модифікована поверхня, субмікро- й наноструктурування, випробування на розтяг, міцність, пластичність, внесок поверхневого шару, зміцнення, пластифікація.

Вступ

Експлуатація продукції машинобудування різного призначення переконливо довела пріоритетний вплив стану поверхневого шару, що визначається як геометричними, так і фізико-механічними параметрами, на надійність і довговічність деталей машин, а отже, виробів загалом. Як відомо, прояви більшості дефектів і небажаних процесів, таких як утворення тріщин, втомне й корозійне руйнування, зміна хімічного та фазового складу, знеміцнення починаються саме з поверхні.

Поверхневі шари мають суттєві відмінності за складом, структурою, фізико-хімічними та фізико-механічними властивостями від усього об'єму виробу, але є невід'ємною частиною твердого тіла і найчастіше впливають на його експлуатаційні характеристики в умовах силового навантаження. Отже, пошук способів модифікування поверхні з метою отримання властивостей виробів, які б найбільш повно відповідали умовам експлуатації та забезпечували підвищення їхнього ресурсу, є актуальною проблемою.

Аналіз публікацій

Поверхневий шар – це шар, у якого найчастіше структура, фазовий і хімічний склад відрізняються від основного матеріалу, з якого виготовлений виріб. Це дало підставу розглядати поверхневі шари навантаженого твердого тіла як відкриту самостійну підсистему, поведінка якої в процесі деформації значно впливає на механічні характеристики виробу загалом [1, 2].

Цей факт підтверджується роботами [3, 4], автори яких зафіксували значний вплив обробки поверхні на діаграму «напруження-деформація».

Вплив стану поверхневого шару на характеристики міцності й вид діаграми розтягання зазначали й автори [10].

Як відомо, найбільш ефективним методом підвищення експлуатаційних характеристик виробів є подрібнення зерна, бо саме цей механізм зміцнення не викликає зниження пластичності, ударної в'язкості й порога холодноламокості. Особлива увага у зв'язку з цим приділяється субмікро- та наноструктуруванню. Однак виготовлення промислових габаритних виробів із наноструктурованих конструкційних сталей на сьогодні неможливо й увага науковців зосереджена на технологіях наноструктурування поверхневих шарів та їхньому впливові на деформаційну поведінку і властивості виробів під дією навантаження.

Автори [3, 7, 8] за рахунок наноструктурування поверхневого шару досягали підвищення показників міцності за умови одночасного збільшення пластичності.

Значне збільшення показників міцності й пластичності після значного диспергування структури на поверхні зразка сталі Ст3 під дією ультразвукової обробки виявили автори роботи [9].

Автором [10] на прикладі високоміцної мартенситно-старіючої сталі показана можливість управління механічними властивостями в умовах статичного й циклічного де-

формування шляхом модифікування поверхні іонно-променеви́м впливом та її наноструктурування. Особливої уваги заслуговує одночасне поліпшення зазвичай протилежних показників – міцності і пластичності.

Застосування нанотехнологій, результати, які показали можливість їхнього використання за умови впливу тим чи іншим шляхом на поверхневі шари виробів, не змінюючи серцевину, дали новий поштовх до дослідження ролі стану поверхні у формуванні необхідних характеристик залежно не тільки від умов експлуатації конкретної деталі, а й від її геометрії та розмірів. Це питання має безперечний як науковий, так і практичний інтерес.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є дослідження процесу структуроутворення поверхневого шару під дією іонного бомбардування (ІБ) та його впливу на властивості виробів з урахуванням масштабного фактора. Для досягнення мети були поставлені такі завдання: визначити характерні особливості мікроструктури поверхневого шару після ІБ і дослідити його вплив на поведінку під час розтягання масивних циліндричних та плоских зразків із низьковуглецевої сталі з метою урахування масштабного фактора в зміні їхніх властивостей.

Матеріал і методики досліджень

Були проведені випробування на розтяг плоских сталевих зразків ($200 \times 20 \times 1,2$ мм) із відпаленої сталі 20.

Зразки піддавали ІБ на установці «Булат – 3т» низькоенергетичними іонами титану (до 3кеВ) в середовищі аргону за таким режимом: тиск $\sim 0,13$ Па; $U = 900\text{--}1000$ В, $I = 95\text{--}100$ А. Час бомбардування варіювався від 30 с до 2 хв залежно від розмірів зразків. Для рівномірності обробки циліндричні зразки обертали навколо осі, а плоскі бомбардували з обох сторін.

Враховуючи, що товщина модифікованого шару поверхні не перевищувала 1 мкм, у розрахуванні величини його внеску в зміни деформаційної поведінки зразків та їхніх властивостей за площу перерізу брали довжину кола циліндричних зразків або периметр плоских зразків. Оскільки довжина ділиться на площу, то внесок поверхневого шару (ВПШ) має розмірність мм^{-1} .

Випробування на розтягування проводили на розривній машині UIT-STM-50 згідно з чинним стандартом.

Вимірювання нанотвердості проводили на нанотвердомірі Nanoindenter II (MTS Systems Corporation, OakRidge, USA) індентором Берковича.

Для визначення розподілу нанотвердості за глибиною поверхневого шару була використана методика С.Н. Дуба [36], що дозволяє визначити середній контактний тиск для всіх точок діаграми навантаження і більш точно оцінити значення нанотвердості за всією глибиною модифікованого поверхневого шару.

З метою оцінки розподілу компонентів та їхньої ідентифікації в поверхневих шарах зразків, оброблених потоком низькоенергетичної плазми, використаний мікрорентгеноспектральний аналіз.

Мікроструктуру вивчали на оптичному мікроскопі UIT MicroMet-I-102 BD, растровому електронному РЕМ–106 ВАТ SELMI з приставкою для мікрорентгеноспектрального аналізу.

Основні результати досліджень

Стан поверхні зразків до та після ІБ зображений на рис. 1. Оскільки в сталі 20 на долю феритного складника припадає не менше ніж 80 % структури, то дослідженню підлягали саме чисті зерна фериту.

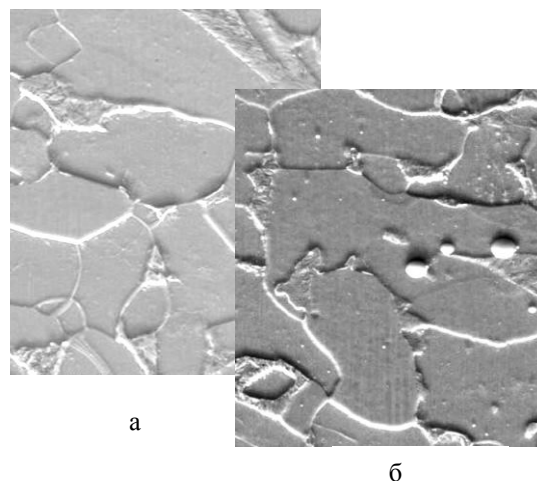


Рис. 1. Поверхня зразків відпаленої сталі 20 до (а) та після (б) ІБ; $\times 1000$

Як свідчить рис. 1, за умови відносно невеликих збільшень (до 1000 крат) помітних змін мікроструктури після ІБ не спостерігається. Після ІБ на поверхні реєструються лише дрібні окремі краплі титану, бо використовувався титановий катод.

У разі збільшення в 8 000 разів (рис. 2, а) картина суттєво змінюється: після ІБ має місце дуже значне подрібнення зерен у тон-

кому поверхневому шарі. Середній розмір зерна до ІБ був 40 мкм, а після ІБ у зернах фериту фіксується розвинена субструктура із розміром елементів 150–200 нм, особливою якої є чіткі субмежі, ширина яких дорівнює 115–57 нм (рис. 2, б), що характерно для субмікро- та нанокристалічного стану металу. Варто зауважити, що структура серцевини зразка не змінюється.

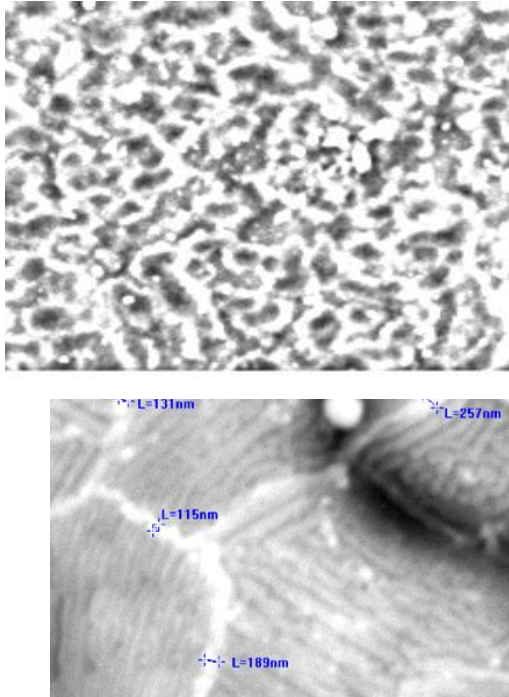


Рис. 2. Мікроструктура поверхні зразка зі сталі 20 після ІБ: а – х 800; б – х 15000

Як показали дослідження, хімічний склад поверхні зразків після ІБ не змінився. Титан, що фіксується в поверхневому шарі в кількості 0,35 % (рис. 3, а) міститься лише в окремих краплях титану, про що свідчить елементний склад однієї з них (рис. 3, б). Дрібні краплі титану осіли на поверхні, бо ІБ здійснювали без сепарації їх. Наявність в спектрі титану Fe та Si пояснюється тим, що під час сканування зондом був захоплений основний метал.

Для оцінки зміни нанотвердості під навантаженням за всією глибиною модифікованого ІБ поверхнього шару був використаний метод розрахунку середнього контактного тиску (СКТ) для кожної точки діаграми навантаження [6]. Результати наведені на рис. 4.

Виявлені дуже суттєві зміни стану модифікованої поверхні згідно із сучасними поглядами мають вплинути на поведінку виробу в процесі деформації та його властивості.

а

Информация			
Напряжение (кВ): 20.00			
Сумма %: 100.00			
Элемент	Инт.	С %	
Fe K	34605	98.74	
Mn K	252	0.72	
Ti K	815	0.35	
Si K	342	0.18	

б

Информация			
Напряжение (кВ): 20.00			
Сумма %: 100.00			
Элемент	Инт.	С %	
Ti K	40710	97.07	
Fe K	647	2.75	
Si K	347	0.17	

Рис. 3. Елементний склад поверхні зразків (а) та краплі титану (б) після ІБ

Як видно на рис. 4, на поверхні зареєстрована нанотвердість 11 ГПа, на глибині 30 нм вона різко зменшується до 5 ГПа, а далі монотонно знижується і наближається до вихідного значення 2,7 ГПа на глибині 100 нм.

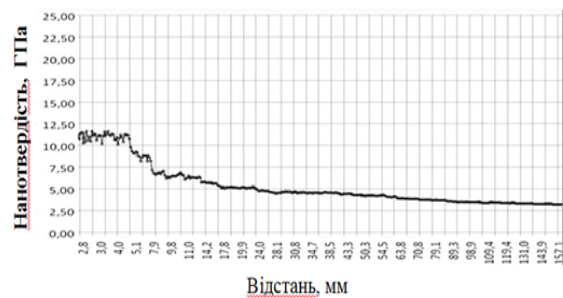


Рис. 4. Крива нанотвердості, що розрахована за методом СКТ

Для підтвердження цього положення в табл. 1 наведені значення механічних характеристик після випробувань на розтяг циліндричних зразків різного розміру і в різному вихідному стані: після відпалу, з наступним ІБ та зі знятим шліфуванням модифікованим шаром. Із таблиці видно, що ІБ не дуже суттєво впливає на властивості циліндричних зразків діаметром 5 і 10 мм, і можна зауважити, що для таких розмірів масштабний фактор незначний. Звертає на себе увагу однакова твердість серцевини.

Таблиця 1 – Результати випробувань на розтяг циліндричних зразків сталі 20 після різної обробки виробництва та механічні характеристики

Стан	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	S_k , МПа	δ , %	ψ , %	HV ₅
Діаметр зразка 5 мм						
Відпал	445	230	910	31	58	130
Відпал + ІБ	515	290	1010	31	60	133
Відпал +ІБ + шліф	442	230	905	30	60	129
Діаметр зразка 10 мм						
Відпал	440	230	950	30	60	130
Відпал + ІБ	510	295	1050	31	62	132
Відпал +ІБ + шліф	440	235	1000	30	61	129

З таблиці видно, що ІБ на 16 % підвищує σ_b і на 26 % $\sigma_{0,2}$. На 11 % підвищується дійсний опір руйнуванню S_k .

Показники пластичності δ та ψ залишаються практично незмінними на тому самому високому рівні. Незмінною є і мікротвердість, тобто на глибині проникнення індентора (~ 7мкм) зміцнення не реєструється.

Отримані результати свідчать, що ІБ поверхні підвищує показники міцності й водночас зменшує вірогідність крихкого руйнування, оскільки зберігаються високим показник S_k і характеристики пластичності.

Частина зразків після ІБ була прошліфована на глибину 0,5 мм для виявлення впливу структурних змін саме модифікова-

ного поверхневого шару на механічні властивості. Шліфування привело до зняття поверхневого шару і зниження показників міцності до рівня вихідного стану (після відпалу). Цей факт підтверджує, що ІБ тонкого поверхневого шару змінює не властивості матеріалу зразків, а поведінку під час розтягання, що і сприяє їхньому зміцненню. Треба зазначити, що структура матеріалу серцевини зразків залишилася незмінною, про що свідчать дані твердості на глибині проникнення індентора.

У табл. 2 наведені механічні властивості після розтягання плоских зразків, які були оброблені за однаковими режимами, що й циліндричні зразки.

Таблиця 2 – Результати випробувань плоских зразків на розтягання

Стан	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	S_k , МПа	δ , %	ψ , %	HV ₅
Відпал	400	220	690	13	15	132
Відпал + ІБ	425	260	900	24	39	133

Зразу ж привертає увагу суттєва зміна властивостей у плоских зразків. За умови зростання σ_b на 9 % , $\sigma_{0,2}$ на 14 % , S_k на 30 % δ підвищується на 76 % , а ψ – на 160 % ! Водночас твердість по всьому перерізу зразків також залишалася однаковою на рівні вихідного стану.

Отримані результати переконливо доводять, що в циліндричних зразках має місце зміцнення за умови збереження пластичності. У плоских зразках дуже суттєво зростає пластичність поряд із підвищенням міцності. Оскільки всі зразки були з однієї марки сталі, підлягали ІБ за однакових умов і глибина модифікованого шару була також однаковою, то різку різницю в поведінці таких зразків у процесі розтягання й зміну їхніх механічних характеристик можна пояснити лише

внеском поверхневого модифікованого шару, який позначимо

Таблиця 3 – Значення внеску модифікованого ІБ поверхневого шару для різних зразків

Зразок	d_0 , мм	S_{MM}^2	ℓ , мм	A , мм ⁻¹
циліндричний	5	19,62	15,7	0,8
Зразок	(Δ), м	S_{MM}^2	(P), мм	A_{MM}^{-1}
плоский	1,2	15,0	27,4	1,83

Висновки

1. ІБ виробу низькоенергетичними іонами формує тонкий поверхневий шар (менше ніж 1 мкм) із розміром зерен від 150 до 200 нм,

розвиненою субструктурою та широкими чіткими межами, яка характерна для субмікро- та нанокристалічного стану металу.

2. Стан поверхні після ІБ, а саме її субструктура, відношення площі модифікованого шару до площі всього перерізу, суттєво впливають на поведінку зразків та формування їхніх властивостей у процесі розтягання. Механічні характеристики самого матеріалу залишаються незмінними.

3. Зміна властивостей зразків у процесі розтягання, головним чином, залежить від вкладу поверхневого шару A . Якщо $A < 1$ (циліндричні зразки), має місце зміцнення без падіння пластичності літерою A .

Раніше було зазначено, що під час підрахунків цього внеску для циліндричних зразків використали співвідношення довжини його кола ℓ до вихідної площі всього зразка S . Для плоских зразків – співвідношення периметра P до вихідної площі зразка. Таким чином визначається внесок шару на одиницю товщини зразка.

У табл. 3 наведені значення A для зразків різної геометрії. Як видно, із зменшенням товщини зразка A зростає пластичність більш ніж удвічі.

Отже, можна зазначити, що значна пластифікація зразків за умови підвищення міцності відбувається, якщо $A > 1$. Якщо ж $A < 1$, має місце зміцнення без падіння пластичності.

Отримані результати переконують, що ІБ може бути самостійною обробкою для суттєвого підвищення конструктивної міцності виробів. Якщо $A > 1$ (тонкі плоскі зразки), відбувається значна пластифікація за умови підвищення міцності, чого неможливо досягти жодним способом об'ємної обробки.

Література

1. Multilevel wave model of a deformed solid in physical mesomechanics / V.E. Panin, Yu.V. Grinyayev, A.V. Panin, S.V. Panin // Proceedings of the Sixth International Conference for Mesomechanics «Multiscaling in Applied Science and Emerging Technology. Fundamentals and Applications in Mesomechanics». – 2004. – P. 335–342.
2. Панин В.Е. Панин А.В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 7–15.
3. Дошечкіна І.В., Татаркіна І.С. Епіламування поверхні як спосіб пластифікації холоднокатаних низьковуглецевих сталей // Вісник Харківського національного автомобільно-

дорожнього університету. – 2020. – Вип. 88. – Т. 1. – С. 17–22.

4. Мухин В.С., Смыслов А.М. Инженерия поверхности деталей машин // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 12. – № 4(33). – С. 106–112.
5. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. – Москва: Наука, 1983. – 280 с.
6. Смолякова Л.Г., Терентьев В.Ф. Влияние структурного состояния поверхности молибденовой проволоки на характер кривых деформации // Физика и химия обработки материалов. – 1969. – № 4. – С. 74–82.
7. Панин В.Е., Панин Л.Е. Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 5–23.
8. Панин А.В., Клименов В.А., Почивалов Ю.И. Влияние состояния поверхностного слоя на механизм пластического течения и сопротивление деформации малоуглеродистой стали // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4. – № 4. – С. 85–92.
9. Влияние предварительного ультразвукового поверхностного деформирования на износостойкость титанового сплава ВТ6, подвергнутого химико-термической обработке / В.Е. Панин, А.Е. Колгачев, С.В. Панин, Ю.И. Почивалов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 144–149.
10. Гуров В.В. Підвищення конструктивної міцності сталевих виробів шляхом поверхневого наноструктурування іонним бомбардуванням: автореферат дис. ... кандидата технічних наук: спец. 05.16.01 «Матеріалознавство і термічна обробка металів і сплавів». – Москва, 2003. – 24 с.
11. Дуб С. Н., Новиков Н. Испытание твердых тел на нанотвердость // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 6. – С. 16–33.

References

1. Multilevel wave model of a deformed solid in physical mesomechanics / V.E. Panin, Yu.V. Grinyayev, A.V. Panin, S.V. Panin // Proceedings of the Sixth International Conference for Mesomechanics «Multiscaling in Applied Science and Emerging Technology. Fundamentals and Applications in Mesomechanics». – 2004. – P. 335–342.
2. Panin V.Ye., Panin A.V. (2005). Effekt poverkhnostnogo sloya v deformiruyemom tverdom tele [The effect of the surface layer in a deformable solid] *Fizicheskaya mezomekhanika* [in Russian].
3. Doschekina I.V., Tatarikina I.S. (2020). Epilamuvannya poverkhnii yak sposob plastifikatsiyi kholidnokatanuyu niz'kovuhletsevikh staley [Epilation of the surface as a method of plasticization of cold-

- rolled low-carbon steels] *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University* [in Ukraine].
4. Mukhin V.S., Smyslov A.M. (2009) Inzheneriya poverkhnosti detaley mashin [Surface Engineering of Machine Parts] *Vestnik UGATU* [in Russian].
 5. Alekhin V.P. (1983) Fizika prochnosti i plastichnosti poverkhnostnykh sloyev materialov [Physics of strength and plasticity of surface layers of materials] [in Russian].
 6. Smolyakova L.G., Terent'ev V.F. (1969). Vliyaniye strukturnogo sostoyaniya poverkhnosti molibdenovoy provoloki na kharakter krivyykh deformatsii [Influence of the structural state of the surface of molybdenum wire on the nature of deformation curves] *Physics and chemistry of materials processing* [in Russian].
 7. Panin V.E., Panin L.E. Masshtabnyye urovni gomeostaza v deformiruyemom tverdom tele [Scale levels of homeostasis in a deformable solid] *Physical mesomechanics* [in Russian].
 8. Panin V.E., Klimenov V.A., Pochivalov Yu.I. (2001). Vliyaniye sostoyaniya poverkhnostnogo sloya na mekhanizm plasticheskogo techeniya i soprotivleniye deformatsii malouglerodistoy stali [Influence of the surface layer state on the mechanism of plastic flow and resistance to deformation of low-carbon steel] *Physical mesomechanics* [in Russian].
 9. Panin V.E., Kolgachev A.E., Panin S.V., Pochivalov Yu.I. (2006). Vliyaniye predvaritel'nogo ul'trazvukovogo poverkhnostnogo deformirovaniya na iznosostoykost' titanovogo splava VT6, podvergnutogo khimiko-termicheskoy obrabotke [Influence of preliminary ultrasonic surface deformation on wear resistance of titanium alloy VT6 subjected to chemical-thermal treatment] *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* [in Russian].
 10. Gurov V.V. (2003) Alignment of constructive performance of steel virobovs by way of surface nanostructure for ion bombardments: abstract of dis. candidate of technical sciences: spec. 05.16.01 "Materials science and heat treatment of metals and alloys" [in Russian].
 11. Dub S.N. Ispytaniye tverdykh tel na nanotverdost' [Test of solids for nanohardness] *Sverkh'tverdyye materialy* [in Ukraine].

Дошечкіна Ірина Василівна, к.т.н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. (057)707-37-92,

e-mail: divkhadi@ukr.net, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002, Україна.

The role of scale factor in the formation of product properties under the action of surface modification

Abstract. *Based on theoretical and experimental research in the fields of solid-state physics and physical materials science, it is proved that the surface layer of a solid body, which is deformed, is an independent functional subsystem and radically affects large-scale levels of plastic flow and destruction of the product as a whole. As is known, the most effective method of improving the performance of products is the grinding of grain, because it is the grain boundary (substructural) mechanism of strengthening which provides an increase in the structural strength of the product. In this regard, special attention is paid to submicro- and nano-structuring of the surface. **Goal.** The aim of the work is to study the process of structure formation of the surface layer under the action of ion bombardment (IB) and its effect on the properties of products taking into account the scale factor. To achieve this goal, the following tasks were set: to evaluate the characteristics of the surface microstructure after IB and to study its tensile behavior in cylindrical and flat samples of low-carbon steel in order to take into account the scale factor in changing their properties. The submicro-structuring of the surface by ion bombardment is carried out in the work and its influence on the behavior of products during tensile deformation is investigated. It is established that the presence of a thin modified layer (with a constant core) significantly changes the properties of the product under force. The decisive role belongs to the contribution of the surface layer (scale factor) – the ratio of the area of the modified layer to the volume of the product: if it is <1 the effect of hardening is better realized while maintaining plasticity, and if > 1 , it is a significant effect of plasticization which maintains (or even increases) hardening.*

Key words: *low carbon steel, surface condition, of ion bombardment, surface modification, submicro-structuring, tensile tests, strength, ductility, the contribution of the surface layer, hardening, plasticization.*

Doschekhina Irina, PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, tel. (057)707-37-92, e-mail: divkhadi@ukr.net. Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo st. Kharkiv, 61002, Ukraine.