

Князєв С. А.

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
E-mail: obmeninfoserg@ukr.net

**ВСТАНОВЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ УДАРНОЇ  
В'ЯЗКОСТІ НА СТАЛІ МАРТЕНСИТНОГО КЛАСУ  
ПІСЛЯ ПІЧНОГО БОРУВАННЯ З ПАСТ**

УДК 621.78

**Князєв С. А. «Встановлення показників ударної в'язкості на сталі мартенситного класу після пічного борування з паст»**

Наряду з підвищенням міцності і зносостійкості необхідно контролювати параметри ударної в'язкості. Ударна в'язкість гарантує той запас, при якому забезпечується реалізація в'язкого механізму руйнування. Крихкий матеріал не може бути використаний в якості конструкційного. Тому при розробці ефективних технологій зміцнення слід контролювати параметр ударної в'язкості. Нержавіючі сталі мартенситного класу мають високі антикорозійні властивості і характеристики міцності, однак можуть мати низькі показники ударної в'язкості при певних видах обробки.

Для зміцнення поверхні сталі мартенситного класу запропоновано пічне високотемпературне борування. Борування проводилось з паст у окисному середовищі пічної атмосфери. Сам процес не потребує спеціального обладнання, окрім звичайної термічної печі з електронагрівом. Застосування паст дозволяє проводити локальне зміцнення, економити реагенти і захищати поверхню від окислення і знеуглецювання. В результаті обробки сталі мартенситного класу отримано шари товщиною 30 – 60 мкм на протязі трьох годин. Мікротвердість на поверхні становить приблизно 20000 МПа. Показники ударної в'язкості становлять 67 – 58 Дж/см<sup>2</sup>. Параметр ударної в'язкості зменшується зі збільшенням температури нагріву, що обумовлено головним чином збільшенням голок мартенситу та коагуляцією карбідів. Особливо помітними змінами у макроструктурі зламу мають зразки, боровані при температурі 1100 °С. При такій температурі розвиваються процеси збільшення розмірів структурних складових. При менших температурах обробки макроструктура зламу є більш рельєфною. Додаткову інформацію дає кількісний аналіз зон зламу. Такий аналіз дозволяє оцінити внесок поверхневого зміцнення та основної структури.

**Ключові слова:** борований шар, мікротвердість, ударна в'язкість, паста, пічний нагрів, злам.

**Князєв С. А. «Установление показателей ударной вязкости на стали мартенситного класса после печного борирования из паст»**

Наряду с повышением прочности и износостойкости необходимо контролировать параметры ударной вязкости. Ударная вязкость гарантирует тот запас, при котором обеспечивается реализация вязкого механизма разрушения. Хрупкий материал не может быть использован в качестве конструкционного. Поэтому при разработке эффективных технологий упрочнения следует контролировать параметр ударной вязкости. Нержавеющие стали мартенситного класса имеют высокие антикоррозийные свойства и прочностные характеристики, однако могут иметь низкие показатели ударной вязкости при определенных видах обработки.

Для упрочнения поверхности стали мартенситного класса предложено печное высокотемпературное борирование. Борирование проводилось из паст в окислительной среде печной атмосферы. Сам процесс не требует специального оборудования, кроме обычной термической печи с электронагревом. Применение паст позволяет проводить локальное упрочнение, экономить реагенты и защищать поверхность от окисления и обезуглероживания. В результате обработки стали мартенситного класса получено слои толщиной 30 - 60 мкм в течение трех часов. Микротвердость на поверхности составляет примерно 20000 МПа. Показатели ударной вязкости составляют 67 - 58 Дж / см<sup>2</sup>. Параметр ударной вязкости уменьшается с увеличением температуры нагрева, что обусловлено главным образом увеличением игол мартенсита и коагуляцией карбидов. Особенно заметными изменениями в макроструктуре излома имеют образцы, борованные при температуре 1100 °С. При такой температуре развиваются процессы увеличения размеров структурных составляющих. При меньших температурах обработки макроструктура излома становится более рельефной. Дополнительную информацию дает количественный анализ зон излома. Такой анализ позволяет оценить вклад поверхностного упрочнения и основной структуры.

**Ключевые слова:** Борированный слой, микротвердость, ударная вязкость, паста, печной нагрев, излом.

**S.A. Knyazev "Establishment of Impact Toughness Indices on Martensitic Steel after Furnace Boring from Pastes"**

Along with increasing the strength and wear resistance, it is necessary to control the parameters of impact toughness. Impact toughness guarantees the margin at which the ductile fracture mechanism is realized. A fragile material cannot be used as a structural material. Therefore, when developing effective hardening technologies, the impact toughness parameter should be controlled. Martensitic stainless steels have high anti-corrosion properties and strength characteristics, however, they can have low impact toughness in certain types of processing.

For hardening the surface of martensitic steel, high-temperature furnace borating is proposed. Boring was carried out from pastes in an oxidizing environment of an oven atmosphere.

*The process itself does not require special equipment, except for the usual electric heating furnace. The use of pastes allows for local hardening, saving reagents and protecting the surface from oxidation and decarburization. As a result of the processing of martensitic steel, layers with a thickness of 30 - 60 microns were obtained for three hours. The microhardness on the surface is approximately 20,000 MPa. Impact strength indicators are 67 - 58 J / cm<sup>2</sup>. The impact toughness parameter decreases with increasing heating temperature, which is mainly due to an increase in martensite needles and coagulation of carbides. Specimens boiled at a temperature of 1100 °C have especially noticeable changes in the macrostructure of the fracture. At this temperature, processes of increasing the size of structural components develop. At lower processing temperatures, the fracture macrostructure becomes more prominent. A quantitative analysis of the kink zones provides additional information. This analysis makes it possible to evaluate the contribution of surface hardening and the basic structure.*

**Keywords:** Borovan layer, microhardness, impact strength, paste, furnace heating, fracture.

## **Вступ**

Ударна в'язкість важливою механічною характеристикою. У зв'язку з цим при розробці технологій зміцнення важливим є той факт, що паралельно зі зростанням міцності показники ударної в'язкості відповідальних машин та елементи агрегатів мали допустимий рівень цього параметру, тобто конструкційний матеріал не повинен бути крихким. Високолеговані сталі мартенситного класу є широко розповсюдженими нержавіючими сталями які у багатьох режимах термічної обробки забезпечують високі показники міцності. Тому для деталей машин та інструменту, що виготовляються зі сталей мартенситного класу ефективним є поверхневе зміцнення зі збереженням в'язкої серцевини.

## **Актуальність проблеми**

Відповідальні деталі, що працюють при ударних навантаженнях та в умовах зношування повинні мати високий комплекс механічних характеристик. Об'ємна зміцнююча термічна обробка де дозволяє отримати високий комплекс властивостей, тому прогресивнішою є технологія поверхневого зміцнення, наприклад борування. Тому актуальним залишається питання модифікування поверхні з метою її зміцнення і збереження рівня ударної в'язкості.

## **Аналіз останніх досліджень**

Борування забезпечує формування твердого шару з боридів FeB (18000 МПа) та Fe<sub>2</sub>B (14000 МПа) [1]. Ці структури мають підвищену крихкість [2]. Окрім цього збиральна рекристалізація призводить до збільшення розміру мікроструктур цих складових [3]. Відомі способи борування довготривалі (6 - 8 годин), а нові способи вимагають витрати значної кількості енергії і потребують коштовного обладнання [4]. Тому актуальним залишається питання вибору раціонального середовища обробки і вдосконалення вже існуючих методів [5 - 6].

## **Формулювання мети дослідження**

Метою роботи було виявлення впливу формування борованого шару на показники ударної в'язкості та мікротвердості. Показати взаємозв'язок між макро-, мікроструктурою та механічними властивостями, а також порівняти результати пічного борування з результатами борування з швидкісним нагріванням струмами високої частоти і виявити придатність методу зміцнення до вимог, матеріалу лопатки парової турбіни. Данні по дослідженню були використані для порівняння борованих шарів, отриманих з нагріванням СВЧ.

### Результати дослідження

Для встановлення показників ударної в'язкості борування проводилось на стандартних зразках зі сталі 15X11МФ в інтервалі температур  $t = 1000 \dots 1100$  °С протягом 3-х годин. Насичуюче середовище представляє собою пасту, яка в свою чергу, складається з 60% порошку карбіду бору та 40% активатору NaF. Цей порошок змішувався на зв'язуючому, який складався з водного розчину клею КМЦ. На рис. 1 представлений зовнішній вигляд зразків після нанесення пасту.



Рис. 1. Зразки на ударний згин після нанесення насичуючої пасту

Проведені дослідження наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Перелік умов експерименту		
T, °C	Індекс зразків	Сталь
1000	П1.1, П1.2	15X11МФ
1050	П2.1, П2.2	
1100	П3.1, П3.2	

Результатами борування було отримання борованих шарів на всіх зразках (рис. 2). На всіх зразках було отримано достатньо рівномірний борований шар з однаковою морфологією.

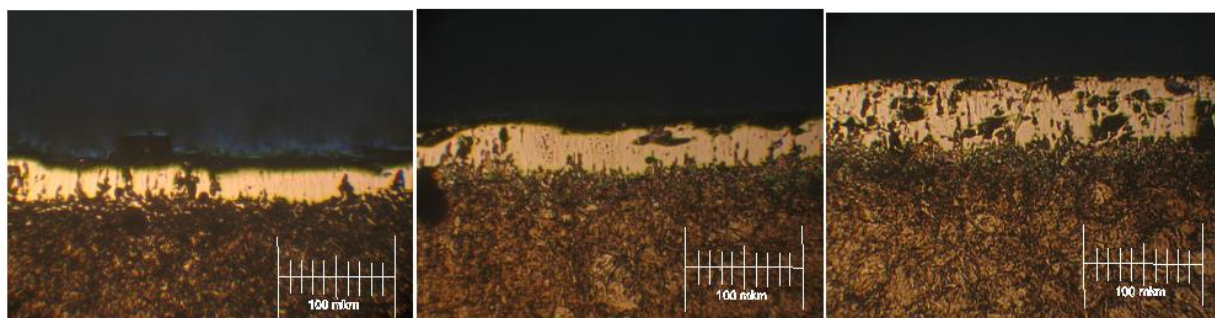


Рис.2. Мікроструктура борованого шару на сталі 15X11МФ отриманого з пасту при пічному боруванні з температурами 1000, 1050 та 1100 °С відповідно

На рис. 3 представлена діаграма, яка показує значення ударної в'язкості зразків зі сталі 15X11МФ з U подібним надрізом (випробування при 20 °С).

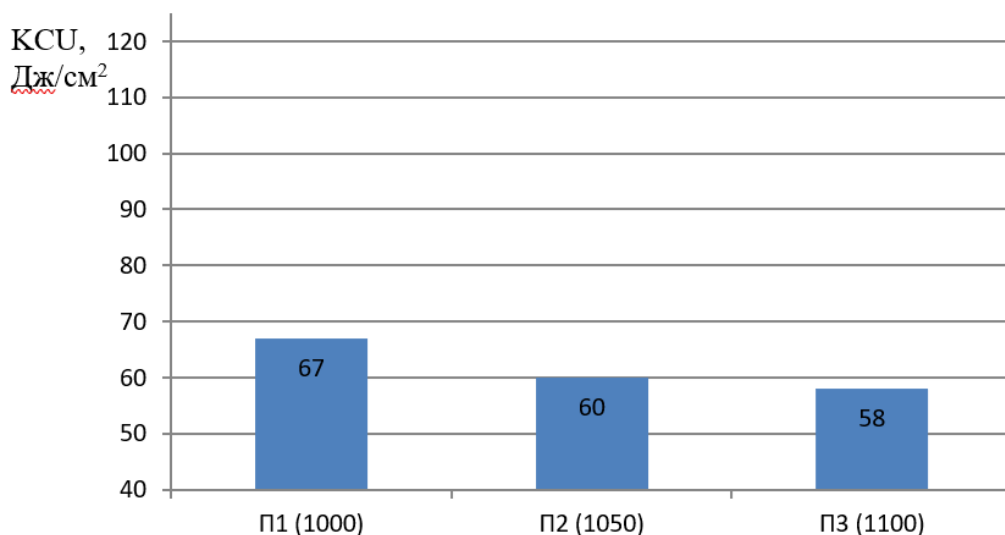


Рис.3. Значення ударної в'язкості зразків після борування у печі

Інтервал вісі ударної в'язкості спеціально вибраний таким чином, щоб охопити мінімальне і максимальне значення (допустимий діапазон), що регламентується вимогами ВАТ «Турбоатом» для заготівель лопаток парових турбін.

Докладний аналіз макроструктур зламів можливий через опис характерних зон руйнування, однак більш повну картину можна отримати після оцінки відносної кількості площини зони від загальної площини зламу. Границі зон визначалися візуально за чітко вираженою границею зміни морфології руйнування. Значення площин визначалось автоматично, у пікселях і перераховувалось у відсотки, що дозволяє знехтувати точністю збільшення при макрозйомці. Результати аналізу відносних площин зон приведені в табл. 2 (колонки 2-4).

На рис. 4 - 6 показано макроструктури зламів ударних зразків з виділеними трьома макрозонами. 1 зона – зона борування та поверхневого термічного впливу (як правило дрібнозерниста, без перепадів по рельєфу); 2 зона – зона зародження і розвитку тріщини; 3 зона – зона серцевини.

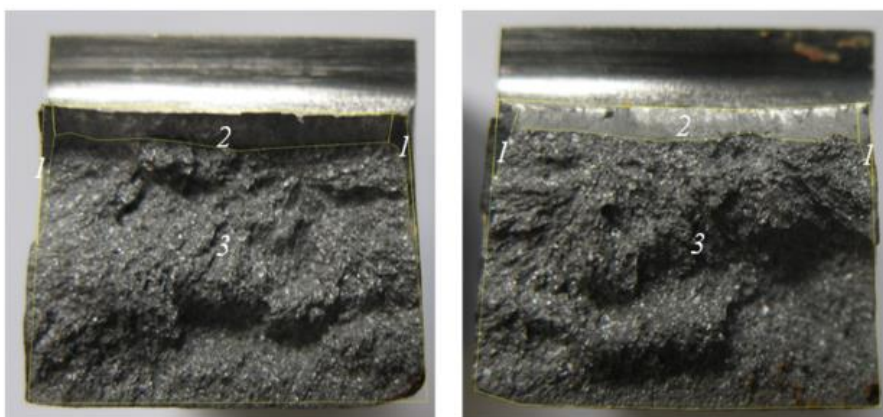


Рис.4. Макроструктура зламів зразків П1.1, П1.2 боруваних у печі при 1000 °С. Зона руйнування у зразку з максимальною ударною в'язкістю

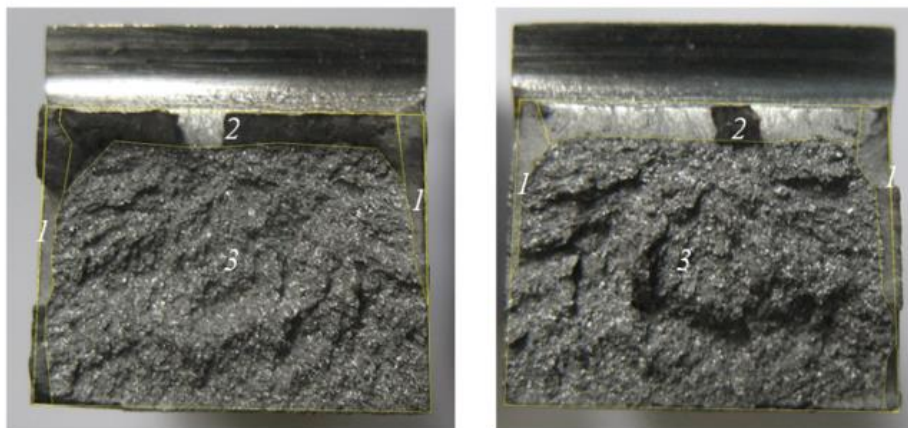


Рис.5. Макроструктура зламів зразків П2.1, П2.2 борованих у печі при 1050 °С

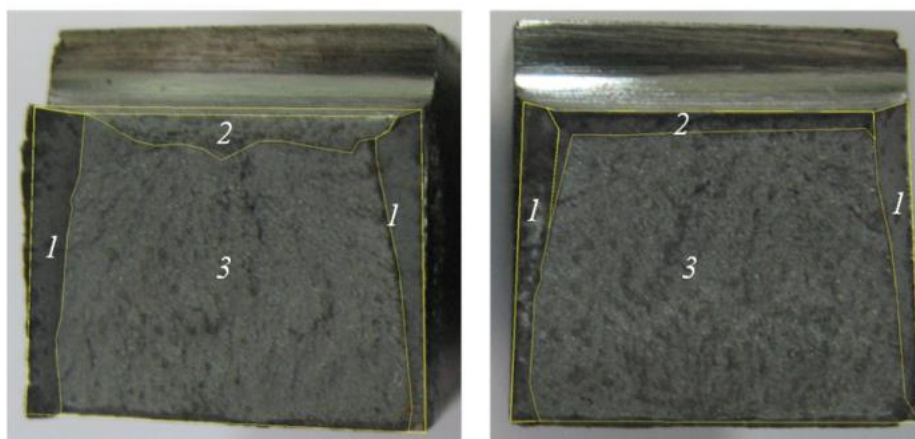


Рис.6. Макроструктура зламів зразків П3.1, П3.2 борованих у печі при 1100 °С. Характер зламу різко змінився. Зона руйнування у зразку з мінімально отриманою ударною в'язкістю

Результати розрахунків приведені у табл. 2.

Таблиця 2

Сукупні характеристики аналізу зламів в порівнянні з показниками ударної в'язкості на зразках зі сталі 15Х11МФ, борованих у печі

Назва зразка	Відносна кількість зони 1	Відносна кількість зони 2	Відносна кількість зони 3	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
П1.1	2,07	10,16	87,77	67
П1.2	2,46	8,8	89,74	67
П2.1	6,77	11,24	81,99	60
П2.2	4,21	9,9	85,89	60
П3.1	16,15	6,83	77,02	58
П3.1	12,51	5,98	81,51	58

## Висновки

1. Металографічний аналіз поперечних розрізів показав наявність порівняно товстих (30...60 мкм) отриманих з паст на основі карбіду бору на протязі 3-х годин обробки.
2. При традиційному пічному боруванні внаслідок інтенсивної дифузії бору, або довготривалості процесу борування, формується щільний дифузійний шар.
3. Показники ударної в'язкості лежать у межах 67 – 58 Дж/см<sup>2</sup>, що є високим показником для сталі мартенситного класу.
4. Основним лімітуючим фактором, який впливає на показники ударної в'язкості є дисперсність структури серцевини. Вона залежить від температури борування і загрубується при її збільшенні від 1050 до 1100 °С. Така зміна мікроструктури відображається у виді зламу і обумовлює зміну рельєфності поверхні зламу.

## Список використаних джерел

1. Kulka M. Current Trends in Boriding. Techniques, 2019. – 282 p
2. Уманский В. Г., Маняк Л. К. Новые способы упрочнения деталей машин: справочное пособие. – Д.: Донбас, 1990. – 100 с.
3. Иванайский В. Влияние природы борировующего агента, флюсов и активаторов на характеристики покрытий, полученных при скоростном борировании легированных сталей / В. Иванайский, А. Ишков, Н. Кривочуров, А. Максимов, Н. Мишустин // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 201 – 203.
4. Mikołajczak D. Laser borided composite layer produced on austenitic 316L steel / D. Mikołajczak, M. Kulka, N. Makuch, P. Dziarski // Arch. Mech. Tech. Mater. – 2016. – № 36. – P. 35 – 39.
5. Погрібний М. А., Князев С. А. Борування конструкційних сталей з використанням насичуючих паст // Металознавство та обробка металів. – 2011. – № 1. – С. 33-38.
6. S.A. Knyazev Features of structure formation of surface layers with high content of boron on steel 15X11MФ in the conditions of furnace and induction heating // Ceramics: Science and Life, 2020. – № 2 (47). – pp. 26 – 30.

## References

1. Kulka M. Current Trends in Boriding. Techniques, 2019. – 282 p.
2. Umansky VG, Manyak LK New methods of hardening machine parts: a reference guide. – D.: Donbas, 1990. – 100 p.
3. Ivanaisky V. Influence of the nature of the borating agent, fluxes and activators on the characteristics of coatings obtained by high-speed borating of alloy steels/ V. Ivanaisky, A. Ishkov, N. Krivochurov, A. Maksimov, N. Mishustin // Polzunovsky Bulletin. – 2010. – No. 3. – P. 201 - 203.
4. Mikołajczak D. Laser borided composite layer produced on austenitic 316L steel / D. Mikołajczak, M. Kulka, N. Makuch, P. Dziarski // Arch. Mech. Tech. Mater. – 2016. – No. 36. – P. 35 - 39.
5. Pogribny M. A., Knyazev S. A. Boruvannya of structural steels from thickened pastes // Metalloznavstvo and obrobka metal\_v. – 2011. – No. 1. – S. 33-38.
6. S.A. Knyazev Features of structure formation of surface layers with high content of boron on steel 15X11MФ in the conditions of furnace and induction heating // Ceramics: Science and Life – No. 2 (47), 2020. – p. 26 - 30.