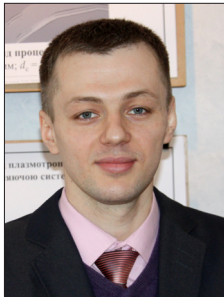




**Vasyl  
P. Nechaev**  
Нечаєв  
Василь  
Павлович



**Anton  
O. Ryazantsev**  
Рязанцев  
Антон  
Олександрович

УДК 621.9.04:533.9: 621.791.947.5

## **THE STUDY OF POSSIBILITY OF PLASMA-ASSISTED MACHINING FOR SHIPBUILDING EQUIPMENT PARTS**

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПЛАЗМОВО-МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ  
ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУДНОБУДУВАННЯ**

**DOI 10.15589/SMI. 2018.02.21**

**Vasyl P. Nechaev**

**В. П. Нечаєв**, канд. техн. наук, доц.  
docent.nechaev@gmail.com

ORC ID: 0000-0001-8817-8636

**Anton O. Ryazantsev**

**А. О. Рязанцев**, канд. техн. наук  
anton.ryazancev87@gmail.com

ORC ID: 0000-0001-6202-6511

*Kyryvi Rih National University, Kyryvi Rih*

*Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг*

**Abstract.** In this article, an analysis of the results of the plasma arc effect on the material of the stock of hard-to-machine materials was conducted and to substantiate the possibility of increasing the productivity of their treatment on metal-cutting machine tools, and a method for implementing the plasma-assisted machining (PAM) process was described. Details of modern equipment for shipbuilding are made of steels and alloys with increased mechanical characteristics, which lead to considerable difficulties in their processing on metal-cutting machines. The processing process is accompanied by increased resistance to cutting, high temperatures in the treatment area, rapid loss of cutting power of the tool. Reducing the negative effects of these factors is possible due to the application of high-temperature plasma heating of the allowance material. The heating of the work piece with a plasma arc causes a number of phenomena: an increase in the ability of the treated metal to plastic deformation; reducing its strength; the emergence of a system of structural transformations and thermal stresses in the surface layers of the work piece; melting of the superficial layer of allowance; change of friction parameters on contact surfaces of a work piece and tool, contact temperature; change in the chemical composition in the surface layers. The technical result from the use of the proposed model of plasma-assisted machining of cast and forged ingots and work pieces with solid casting crust, or from hard-working alloys, provides an improvement in their machining through the creation of an entire inlet section, due to thermal influences, austenitic or other structure that is significantly lower physical and mechanical properties, than the source material of the work piece. As a result, the period of stability of the cutting tool also increases. In real production conditions, it is necessary to comply with the requirements for a source of high-temperature plasma heating: the ability to control the size of the heating zone; no melting of the surface layer; ensuring uniform depth of structural transformations; achieving a rational microstructure of the hardened layer. The use of technology of plasma-assisted machining provides an increase in the productivity of processing work pieces from hard-to-machine materials that are used in shipbuilding, power and mining engineering.

**Keywords:** plasma-assisted machining; structural-phase transformations; allowance; thermal fields.

**Анотація.** Проаналізовано результати впливу плазмової дуги на матеріал припуску заготовок із важкооброблюваних матеріалів, обґрунтовано можливості підвищення продуктивності обробки на металорізальних верстатах, описано процес плазмово-механічної обробки (ПМО). Деталі сучасного обладнання для суднобудування виготовляють зі сталей і сплавів з підвищеними механічними характеристиками, що призводить до значних труднощів під час оброблення на металорізальних верстатах. Процес оброблення супроводжується підвищеним опором різанню, високими температурами в зоні оброблення, швидкою втратою різальної здатності інструмента. Зниження негативного впливу названих факторів є можливим завдяки застосуванню високотемпературного плазмового нагрівання матеріалу зрізаного припуску. Нагрівання заготовки плазмовою дугою викликає низку явищ: збільшення здатності оброблюваного

металу до пластичної деформації, зниження його міцності, виникнення системи структурних перетворень і термічних напружень у поверхневих шарах заготовки, розплавлення поверхневого шару припуску, зміна параметрів тертя на контактних поверхнях заготовки й інструмента, температури контакту, зміна хімічного складу в поверхневих шарах. Технічний результат від використання пропонованої моделі ПМО литих і кованих злитків та заготовок із твердою ливарною кіркою або важкооброблюваних сплавів забезпечує поліпшення оброблюваності шляхом створення по всьому перетину припуску за рахунок термічного впливу, аустенітної або іншої структури, яка має значно нижчі фізико-механічні властивості, ніж вихідний матеріал заготовки. Унаслідок цього також підвищується період стійкості різального інструменту. У реальних виробничих умовах необхідно дотримуватися вимог до джерела високотемпературного плазмового нагрівання: можливість регулювання розмірів зони нагрівання, відсутність оплавлення поверхневого шару, забезпечення рівномірної глибини структурних перетворень, досягнення раціональної мікроструктури зміцненого шару. Застосування технології ПМО забезпечує підвищення продуктивності обробки заготовок з важкооброблюваних матеріалів, які використовуються в суднобудуванні, енергетичному й гірничому машинобудуванні.

**Ключові слова:** плазмово-механічна обробка; структурно-фазові перетворення; припуск; теплові поля.

**Аннотация.** Проанализированы результаты воздействия плазменной дуги на материал припуска заготовок из труднообрабатываемых материалов, обоснованы возможности повышения производительности обработки на металлорежущих станках, описан процесс плазменно-механической обработки (ПМО). Детали современного оборудования для судостроения изготавливают из сталей и сплавов с повышенными механическими характеристиками, что приводит к значительным трудностям при обработке на металлорежущих станках. Процесс обработки сопровождается повышенным сопротивлением резке, высокими температурами в зоне обработки, быстрой потерей режущей способности инструмента. Снижение негативного воздействия названных факторов возможно благодаря применению высокотемпературного плазменного нагрева материала срезанного припуска. Нагрев заготовки плазменной дугой вызывает ряд явлений: увеличение способности обрабатываемого металла к пластической деформации, снижение его прочности, возникновение системы структурных преобразований и термических напряжений в поверхностных слоях заготовки, расплавление поверхностного слоя припуска, изменение параметров трения на контактных поверхностях заготовки и инструмента, температуры контакта, изменение химического состава в поверхностных слоях. Технический результат от использования предлагаемой модели ПМО литых и кованных слитков и заготовок из твердой литейной корки или труднообрабатываемых сплавов обеспечивает улучшение обрабатываемости путем создания по всему сечению припуска за счет термического воздействия, аустенитной или другой структуры, которая имеет значительно худшие физико-механические свойства, чем исходный материал заготовки. В результате также повышается период стойкости режущего инструмента. В реальных производственных условиях необходимо соблюдать требования к источнику высокотемпературного плазменного нагрева: возможность регулирования размеров зоны нагрева, отсутствие оплавления поверхностного слоя, обеспечение равномерной глубины структурных преобразований, достижение рациональной микроструктуры укрепленного слоя. Применение технологии ПМО обеспечивает повышение производительности обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов, используемых в судостроении, энергетическом и горном машиностроении.

**Ключевые слова:** плазменно-механическая обработка; структурно-фазовые превращения; припуск; тепловые поля.

## References

- [1] Loladze, T. N. (1982). *Prochnost i iznosostoikost rezhushchego instrumenta* [Durability and quality wearing of the cutting tool]. M.: Mashynostroenie.
- [2] Poduraev, V. N. (1977). *Automaticheskii reguliruemye i kombinirovannye process rezania* [Automatically adjustable and combined cutting processes]. M.: Mashynostroenie.
- [3] Reznikov, A. N., Shateryn, M. A., Kunin, V. S., & Reznikov, L. A. (1986). *Obrabotka metallov rezaniem s plazmenym nagrevom* [Metal cutting with plasma heating]. M.: Mashynostroenie.
- [4] Nechaev, V. P., & Pozniakov, I. N. (1991). *Strukturnie prevrasheniya v srezaemom sloe pri plazmenno-mekhanicheskoy obrabotke* [Structural transformations in the cut layer during plasma-mechanical processing]. *Plazmotechnologia*, 35–37.
- [5] Bykhovskiy, B. G., Alekseev, K. P., Kunin, V. S., Vassyn, V. M., Nesterov, V. N., & Aleksandrov, V. A. Certificate of authorship USSR № 860936. *Sposob mekhanicheskoy obrabotki s podogrevom* [Method of machining with heating] /; stated 30.09.75, published 07.09.81, Bul. № 33.
- [6] Nechaev, V. P., & Ryazantsev, A. A. (2012). *Modifikatsiya svoystv poverhnostnyh sloev tiazhelonagruzhenyh detaley gornyh mashyn posredstvom plazmennogo uprochneniya* [Surface layers of mining machinery heavily loaded details properties modification by means of plasma hardening] // *Visnyk Kryvyi Rih National University: zbirnyk naukovykh prac* [collection of scientific papers], 32, 123–127.

**Постановка задачі.** Деталі сучасного технологічного встаткування для переробки мінеральної сировини виготовляють зі сталей і сплавів з підвищеними механічними характеристиками, що призводить до значних труднощів під час оброблення на металорізальних верстатах. Процес оброблення супроводжується підвищеним опором різанню, високими температурами в зоні оброблення, швидкою втратою різальної здатності інструмента.

Зниження негативного впливу названих факторів є можливим завдяки застосуванню високотемпературного плазмового нагрівання матеріалу зрізаного припуску.

Вивчення технологічних особливостей плазмово-механічної обробки заготовок деталей технологічного встаткування становить практичний і науковий інтерес, є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Плазмова дуга як високотемпературне джерело нагрівання має широкі технологічні можливості, зокрема вона дозволяє реалізувати різноманітні способи оброблення металів, у яких плазма може виконувати функції інструмента (сплавка припуску) або функції джерела нагрівання, що передують зняттю припуску лезовим інструментом або поверхневому загартовуванню.

Нагрівання заготовки плазмовою дугою викликає низку явищ: збільшення здатності оброблюваного металу до пластичної деформації, зниження його міцності, виникнення системи структурних перетворень і термічних напружень у поверхневих шарах заготовки, розплавлення поверхневого шару припуску, зміна параметрів тертя на контактних поверхнях заготовки й інструмента, температури контакту, зміна хімічного складу в поверхневих шарах [1].

Характер і обсяг проходження перерахованих явищ залежить від теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу, швидкості відносного переміщення заготовки й джерела нагрівання, теплової потужності плазмової дуги. Змінюючи зазначені параметри, можна отримати збільшення ступеня прояву тієї сторони плазмового впливу на матеріал заготовки, домінування якої є доцільним у такому разі [2].

Процес плазмово-механічної обробки (ПМО), за якої поверхневі шари заготовки нагріваються до високих температур, близьких до температури плавлення металу, а потім видаляються різцем у пластичному стані, був запропонований Всесоюзним інститутом електрозварювального обладнання (ВНІЕСО) і ПО «Іжорський завод» [5], а в подальшому розроблялися ними з участю Ленінградського політехнічного інституту й кафедри технології машинобудування Криворізького національного університету [4].

Відомо, що найбільш сприятливі умови обробки середньолегованих сталей типу 5ХНМ і високомарганцевистих сталей типу 110Г13Л створюються за аустенітного переохолодженого стану припуску [3]. Під час вибору глибини різання, що дорівнює максимальній глибині структурних перетворень, вершина різального елемента перетинає на своєму шляху зону

нерозміцненого металу, що може призвести до інтенсивного зношування інструмента. Під час вибору ж глибини різання, що дорівнює мінімальній глибині перетворень, різання відбувається ефективно, однак на обробленій поверхні залишаються зони структурно зміненого (загартованого) металу, що не допускається вимогами до якості поверхневого шару готової деталі.

Спосіб, описаний вище [5], має низку недоліків. Так, розплавлений імпульсом плазмотрона метал у зоні стружкоутворювання не завжди віддаляється з неї, що погіршує процес стружкоутворювання. Крім цього, для того щоб запобігти кристалізації (пакування) розплавленого металу в зоні стружкорозподільної канавки, різець необхідно розташовувати в безпосередній близькості від плями нагрівання (2...5 см), що призводить до перегріву твердосплавного інструмента, його підвищеного зношування й зниження в цілому технологічних можливостей цього способу.

Крім того, розплавлення матеріалу заготовки призводить до утворення в атмосфері виробничого приміщення шкідливих аерозолів з окислів металу, що обмежене санітарними нормами.

Тому спочатку було необхідно сформулювати вимоги або критерії, яким має задовольняти джерело нагрівання в умовах цього способу обробки.

**МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ** — аналіз результатів впливу плазмової дуги на матеріал припуску заготовок із важкооброблюваних матеріалів і обґрунтування можливості підвищення продуктивності обробки на металорізальних верстатах.

**Основний матеріал.** Спосіб різання з плазмовим нагрівом, незважаючи на низку труднощів, пов'язаних з його застосуванням, найбільш продуктивний і економічний під час оброблення високолегованих матеріалів, особливо за умов великого перерізу зрізу. Для успішного впровадження у виробництво цього високопродуктивного процесу, вмілого дозування додаткової теплової енергії, оптимізації режимів ПМО слід урахувати фізичні явища, що виникають під час плазмово-механічного оброблення. Тому необхідно сформулювати вимоги або критерії, яким має задовольняти джерело нагрівання в умовах цього способу обробки.

Перша вимога до джерела нагрівання — можливість регулювання розмірів зони нагрівання. Друга вимога — відсутність оплавлення поверхневого шару. Третій критерій — забезпечення рівномірної глибини структурних перетворень. Четвертий — досягнення необхідної мікроструктури зміцненого шару [6].

В основу процесу розробки технологічних рекомендацій було покладено завдання підвищення продуктивності процесу різання й збільшення стійкості різального інструмента за рахунок застосування схеми нагрівання сканувальною плазмовою дугою, яка дозволяє реалізувати максимальний ККД нагрівання.

Технічний результат від використання запропонованої технології плазмово-механічної обробки литих

і кованих злитків та заготовок із твердою ливарною кіркою або з важкооброблюваних сплавів забезпечує поліпшення оброблюваності шляхом створення по всьому перетину припуску за рахунок термічного впливу, аустенітної або іншої структури, яка має значно більш низькі фізико-механічні властивості, ніж вихідний матеріал заготовки. Унаслідок цього також підвищується період стійкості різального інструменту.

Поставлене завдання вирішується за рахунок способу плазмового нагрівання припуску, яке вміщує поверхневе плазмове нагрівання поверхні різання без оплавлення за заданої сили струму, його знеміцнення припуску, переміщення його в зону обробки зі швидкістю різання й видалення різцем.

Згідно з розробленим способом нагрівання здійснюють дугою, спрямованою фронтально до поверхні різання й коливної щодо свого середнього положення із частотою зовнішнього змінного магнітного поля поперек вектора швидкості різання з амплітудою, що дорівнює 0,8...0,9 ширини поверхні різання. При цьому параметри режиму нагрівання встановлюють так, щоб забезпечити зміцнення структури поверхневого шару деталі на задану глибину, що дозволяє підвищити ефективність процесу різання й збільшити стійкість інструмента.

Значення швидкості різання, яка буде дорівнювати швидкості переміщення плазмової дуги щодо заготовки, встановлюють з урахуванням величини максимальної температури нагрівання припуску для забезпечення структурних перетворень на задану глибину без оплавлення поверхні заготовки:

$$V_p = \left( \frac{I \times U \times \eta}{\theta_{\max} \times b_n \times a_n \times \lambda} \right)^2 \times \frac{\omega \times b_n}{\pi},$$

де  $V_p$  — швидкість різання, м/хв;  $I$ ,  $U$  — сила струму і напруга плазмової дуги;  $\eta$  — тепловий ККД плазмової дуги;  $\theta_{\max}$  — максимальна температура нагрівання припуску ( $\theta_{\max} \leq \theta_{\text{плавл}}$ );  $b_n$ ,  $a_n$  — ширина й довжина плями нагрівання на поверхні різання, мм;  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності, Вт/см·°C;  $\omega$  — коефіцієнт температуропровідності, см<sup>2</sup>/с.

Цей спосіб обробки пояснюється схемою (рис. 1), на якій показано розташування джерела нагрівання й зони нагрівання щодо заготовки.

Джерелом плазмової дуги 3 обрано плазмотрон прямої дії 1. Плазмотрон оснащений магніто-відхиляючою системою 2, яка складається з двох охолоджуваних магнітопроводів, торці яких розташовані біля сопла плазмотрона й перпендикулярні до вектора швидкості різання. Магніто-відхиляюча система приєднана до регульованого джерела живлення змінного струму.

Спосіб реалізується в такий спосіб. Заготовка встановлюється на токарний верстат, на якому змонтований генератор плазми у вигляді однодугового плазмотрона постійного струму. Плазмоутворювальний газ — повітря. Щодо розташування плазмової дуги 3 щодо дугового каналу, а також щодо впливу дуги на оброблюваний матеріал він ставиться до

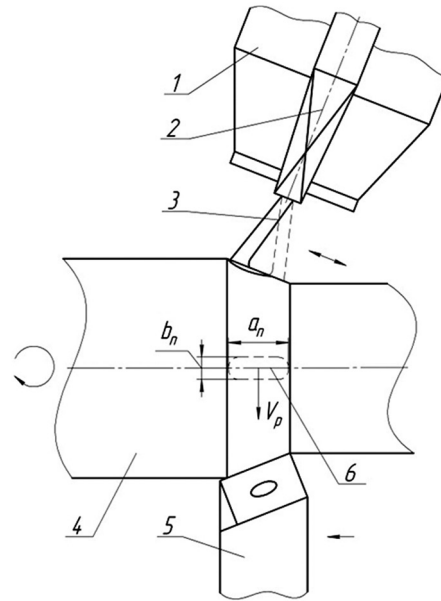


Рис. 1. Схема процесу плазмово-механічної обробки

плазмотронів прямої дії. Зниження локальності нагрівання плазмовою дугою здійснюється за рахунок накладення на потік генерованої плазми зовнішнього змінного магнітного поля. Для створення зовнішнього змінного магнітного поля плазмотрон повітряного різання 1 (ПВР-401) оснащують спеціальною магнітною системою. Плазмотрон генерує електричну дугу, яка горить між катодом плазмотрона й поверхнею різання на заготовці, а в місці контакту реалізує теплову потужність через опорну пляму контакту з розмірами  $a_n$  і  $b_n$ .

Крім того, у зазорі між торцями магнітопроводу 2 на дугу 3 впливають магнітним полем. А оскільки електрична дуга є провідником зі струмом, то в магнітному полі на неї діє сила Лоренца, яка відхиляє дугу в площині, паралельній торцям магнітопроводу 2 і перпендикулярно до вектора швидкості різання у токарній обробці заготовки. Таким чином, зміною напруги на котушках магнітної системи забезпечується можливість зміни величини сили Лоренца, а також змінюється величина відхилення плазмової дуги в магнітному полі. Так, під час сканування плазмової дуги із частотою струму в мережі (50 Гц) пляма нагрівання збільшується в розмірах, локальність нагрівання знижується, що дозволяє нагрівати заготовку без оплавлення її поверхні, а також забезпечує стабільність параметрів процесу плазмово-механічної обробки.

При цьому амплітуда сканування дуги  $a_n$  складає 0,8...0,9 від ширини площини різання. Менше значення амплітуди сканування плазмової дуги встановлюють для матеріалів заготовки з більшим значенням коефіцієнта теплопровідності (леговані сталі), а менше значення — для заготовок з меншим значенням коефіцієнта теплопровідності (титанові сплави), щоб уникнути дефектів на обробленій поверхні.

Так, на оброблюваній поверхні заготовки виникає область термічно знеміцненого металу, що дозволяє збільшати продуктивність механічної обробки різцем у забезпеченні стабільності параметрів процесу плазмового нагрівання внаслідок відсутності оплавлення поверхні заготовки, зменшення ступеня перегріву різця і збільшення його періоду стійкості.

**ВИСНОВКИ.** Проаналізовано результати впливу плазмової дуги на матеріал припуску заготовок з важкооброблюваних матеріалів і обґрунтовано можливості підвищення продуктивності обробки на металорізальних верстатах, описано спосіб здійснення процесу плазмово-механічної обробки.

У реальних виробничих умовах необхідно дотримуватися таких вимог до джерела високотемпературного плазмового нагрівання, як можливість регулювання розмірів зони нагрівання, відсутність опла-

влення поверхневого шару, забезпечення рівномірної глибини структурних перетворень, досягнення необхідної мікроструктури зміцненого шару.

Технічний результат від використання пропонованої моделі плазмово-механічної обробки литих і кованих злитків та заготовок із твердою ливарною кіркою або з важкооброблюваних сплавів забезпечує поліпшення оброблюваності шляхом створення по всьому перетину припуску за рахунок термічного впливу, аустенітної або іншої структури, яка має більш низькі фізико-механічні властивості, ніж вихідний матеріал заготовки. Унаслідок цього також підвищується період стійкості різального інструменту.

Застосування технології плазмово-механічної обробки забезпечує підвищення продуктивності обробки заготовок з важкооброблюваних матеріалів, які використовуються в суднобудуванні, енергетичному й гірничому машинобудуванні.

### Список літератури

- [1] Лоладзе, Т. Н. (1982). *Прочность и износостойкость режущего инструмента*. Москва: Машиностроение.
- [2] Подураев, В. Н. (1977). *Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания*. Москва: Машиностроение.
- [3] Резников, А. Н., Шатерин, М. А., Кунин, В. С., & Резников, Л. А. (1986). *Обработка металлов резанием с плазменным нагревом*. Москва: Машиностроение.
- [4] Нечаев, В. П., & Позняков, И. Н. (1991). Структурные превращения в срезаемом слое при плазменно-механической обработке. *Плазмотехнология*, 35–37.
- [5] Быховский, Б. Г., Алексеев, К. П., Кунин, В. С., Вассин, В. М., Нестеров, В. Н., & Александров, В. А. А.с. СССР № 860936. *Способ механической обработки с подогревом*; заяв. 30.09.75, опубл. 07.09.81, Бюл. № 33.
- [6] Нечаев, В. П., & Рязанцев, А. А. (2012). Модификация свойств поверхностных слоев тяжело нагруженных деталей горных машин посредством плазменного упрочнения. *Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць*, 32, 123–127.

---

© В. П. Нечаев, А. О. Рязанцев  
Статтю рекомендує до друку  
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький