

Рост давления реакционного газа ведет к образованию соединений с участием его атомов, что связано с «лавинообразным» ростом выхода ионов, например,  $N_2^+$ . При этом происходит увеличение различия в соотношении компонентов в катоде и в покрытии. Например, для катодов из сплавов титан-кремний наблюдается уменьшение относительного количества кремния в покрытии. Предположительно это связано с ростом количества поглощенного растущим покрытием азота за счет роста ионизированных частиц – ионов  $N_2^+$ . Однако рост давления может приводить, также, к увеличению рассеяния ионов кремния на молекулах газа. Измерение микро твердости силицидных покрытий осаждаемых в среде реакционного газа показало, что она ведёт себя немонотонно, в отличие от микро твёрдости покрытий, получаемых осаждением однокомпонентных плазменных потоков в среде реакционного газа, у которых наблюдается «насыщение», достигаемое при определенном значении ускоряющего потенциала. При этом в начальной области, где изменения максимальны, фазовый состав покрытий приблизительно постоянен. Это говорит о том, что за счет одновременного протекания на поверхности конденсации нескольких химических реакций, количество растворенного и участвующего в образовании химических соединений газа может меняться в зависимости от условий осаждения.

Формирование вакуумно-плазменных покрытий относится к открытой системе протекания плазмохимических реакций. Изменение концентрации реагентов происходит не только за счет их реагирования друг с другом, но и в результате массопереноса реагентов (ионов - от плазменного источника, атомов технологического газа – в результате контролируемой подачи его в рабочий объём вакуумной камеры). Если для условий плазмохимического синтеза вакуумно-плазменных покрытий считать технологический объём вакуумной камеры реактором идеального смешивания (т.е, допустить, что процесс фазо- и структурообразования происходит в стационарном режиме) тогда изменение концентрации продукта реакции будет пропорционально объёмной скорости подачи реагента к поверхности конденсации и разности концентрации хотя бы одного из реагентов на граница плазма – поверхность покрытия.

1. Иванов И.А. Условия формирования плазмы дугового разряда в вакууме и ее использование для упрочнения поверхностей сталей и сплавов // Современные технологии для заготовительного производства: сб. научных работ респ. н.-технич. конф. Минск: БНТУ. – 2021. – с. 81.

УДК 621.78; 621.179.2

## **ЗАВИСИМОСТЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ**

**Кане М.М., Крайко С.Э., Раманович А.А.**

Белорусский национальный технический университет

Вырубные штампы широко используются при изготовлении различных изделий машино- и приборостроения из листового материала. В общем

количестве штамповой оснастки доля вырубных и пробивных штампов составляет 70...90%. При этом на долю стальных штампов в различных отраслях промышленности (в отличие от твёрдосплавных) приходится 90...95%. Как показывают результаты выполненных ранее исследований [1, 2, 3, 4], современные методы упрочнения инструментальных сталей позволяют увеличить стойкость инструмента от 3 до 7 раз.

Существует много методов поверхностного упрочнения деталей машин. Преимуществами лазерного упрочнения являются отсутствие деформаций поверхности и необходимости её последующей обработки, минимальные расход энергии, стоимость процесса упрочнения и воздействие его на окружающую среду. Рабочие детали штампов (пуансоны и матрицы) подвергаются ударной нагрузке и износу. Поэтому к материалу пуансонов и матриц предъявляются требования высокой твёрдости и износостойкости поверхности при вязкости сердцевины.

Для изготовления рабочих частей штампов для холодной листовой штамповки применяют углеродистые инструментальные стали, высокохромистые стали с высокими значениями прокаливаемости и износостойкости и др. Для исследования выбрана Сталь X12M, которая имеет высокую твёрдость после закалки (58...60 HRC), большую износостойкость и широко используется для изготовления рабочих частей вырубных штампов [1].

Для выполнения исследования нами был выбран CO<sub>2</sub>-лазер «Комета 2» с мощностью излучения до 1000 Вт. Поскольку ширина рабочих поверхностей вырубных штампов составляет 10...200 мм, а диаметр лазерного луча обычно составляет 2...5 мм, было принято решение производить лазерное упрочнение строчками с коэффициентом перекрытия  $K_{пер}$ . Так как шлифованные металлические поверхности отражают до 90% лазерного излучения в исследовании для увеличения светопоглощения на поверхности образцов наносился слой краски различной толщины ( $t=5...15$  мкм) с наполнителем из оксидов металлов. Толщина покрытия измерялась прибором В7-517.

Для повышения эффективности экспериментального исследования влияния условий лазерного термообработки стали X12M (изучалось влияние  $q$ ,  $t$  и  $K_{пер}$ ) на параметр  $R_a$  упрочнённой поверхности нами была использована методика полного факторного эксперимента. По результатам экспериментов построены зависимости. На рисунках 1-3 представлены их графическое изображение.

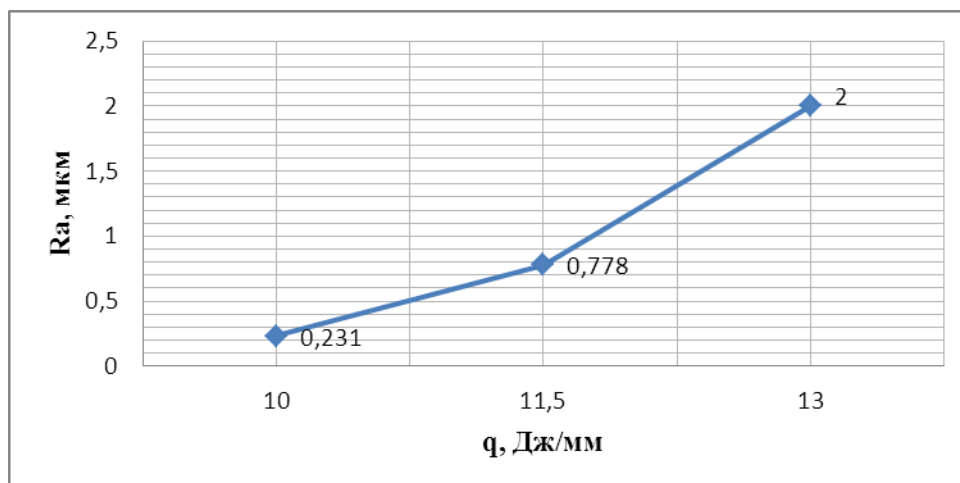


Рис. 1 – График зависимости  $Ra=f(q)$

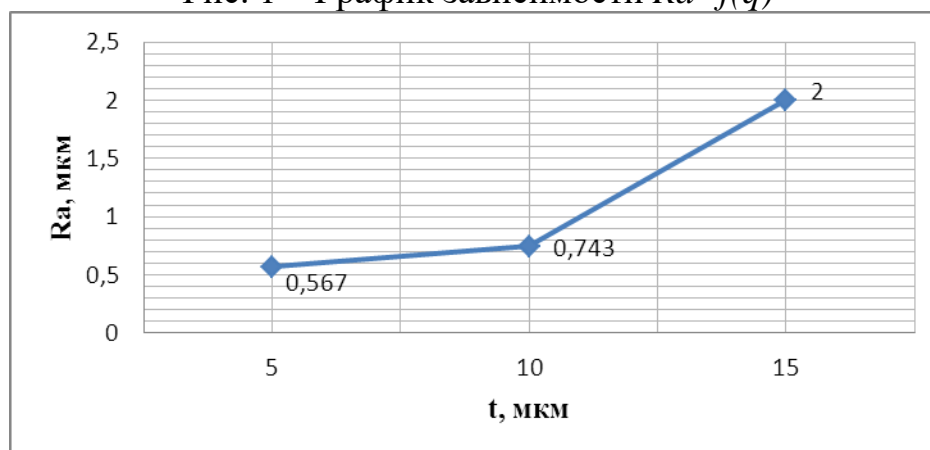


Рис. 2 – График зависимости  $Ra=f(t)$

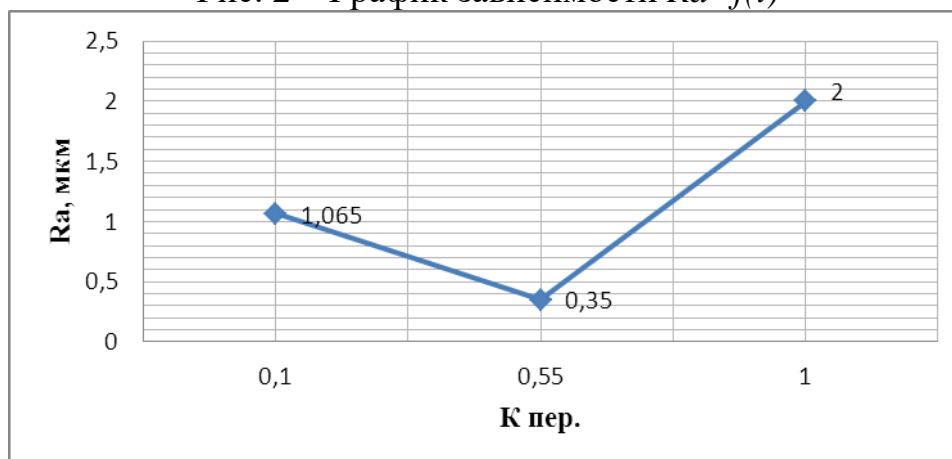


Рис. 3 – График зависимости  $Ra=f(K_{пер.})$

Как видно из приведенных данных:

1. С увеличением значений рассмотренных характеристик лазерной ТО  $q$ ,  $t$  и  $K_{пер}$  имеет место рост значений  $R_a$  упрочнённой поверхности. Это объясняется увеличением количества энергии (теплоты), передаваемой лазерным лучом упрочняемой поверхности с увеличением плотности энергии луча, с увеличением отражающей способности светопоглощающего покрытия при увеличении его толщины, с уменьшением степени отпуска упрочняемой

поверхности при увеличении коэффициента перекрытия дорожек лазерного нагрева поверхности.

2. Получена математическая модель указанных взаимосвязей  $Ra = f(q, t, K_{пер.})$

3. Показана её адекватность и достоверность входящих в неё коэффициентов.

1. Обработка металлов давлением в машиностроении /П.И. Полухин [и др.] - М. Машиностроение, 1983. – 273 с.
2. Астапчик, С.А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке/ С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков. – Минск, Белорус. Наука, 2008. – 251 с.
3. Коваленко, В.С. Лазерная технология.- Киев: Высш. шк., 1989. – 280с.
4. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн.6. Основы лазерного упрочнения сплавов/ Под ред. А.Г. Григорьянца.-М.: Высш. шк., 1988. – 159с.
5. Лисовский, А.Л. Лазерное упрочнение штампового инструмента/А.Л. Лисовский, И.В. Плетнёв.- Могилёв, // Вестник Белорусско-Российского университета, 2008, №3(20). – с. 90-94.
6. Голубев В.С. Лазерная поверхностная обработка материалов и пути повышения её эффективности / В.С. Голубев, В.И. Гуринович, И.А. Романчук. – Минск // Вестник Физико-Технического института НАНБ , №5, 2017.
7. Кане, М.М Основы исследований, изобретательства и инновационной деятельности в машиностроении: учебник / М.М. Кане. – Минск, Высшэйшая школа, 2018. – 366 с.

**УДК 621.793**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

**Керель А.Д.<sup>1</sup>, Ванюк Э.А.<sup>1</sup>, Сокоров И.О.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский Национальный Технический Университет

<sup>2</sup> УО «Республиканский институт профессионального образования»

Развитие машиностроения неразрывно связано с производством новых композиционных материалов и покрытий на основе полимеров. [1]. Полимерное покрытие – это эффективный и надежный способ улучшить эксплуатационные свойства металла и повысить его защитные качества.

В комплексе проблем повышения надежности и долговечности машин особое место занимает вопрос износостойкости и соответственно твердости деталей. Для решения задачи повышения эксплуатационных характеристик материалов привлекают новые методы поверхностного упрочнения, например, различные способы газотермического нанесения покрытий. [2].