

покрытия Ni–V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, оказывает на их микротвердость значительно меньшее влияние, чем наличие в электролите модифицирующей неметаллической фазы, что коррелирует с данными электронно-микроскопического исследования – микроструктура покрытий практически не зависит от плотности катодного тока и принципиально изменяется при введении в электролит оксида ванадия.

В результате проведенных исследований были установлены оптимальные условия синтеза покрытий на основе никеля с повышенной твердостью и коррозионной устойчивостью из высокоскоростных кремнефтористых электролитов, модифицированных оксидом ванадия (V). Доказано, что, несмотря на отсутствие в составе покрытий кристаллического ванадия или его соединений микроструктура полученных покрытий существенно отличается от структуры никеля. Кристаллическая решетка очень искажена; размеры зерен, слагающих композиционные покрытия на 1–1,5 порядка меньше, чем в никелевых пленках, синтезированных при таких же условиях, а сами зерна имеют очень плотную упаковку. Установлено, что покрытия с наиболее равномерной и мелкозернистой морфологией поверхности обладают наивысшей коррозионной устойчивостью и микротвердостью.

#### Л и т е р а т у р а

1. Гамбург, Ю. Д. Гальванические покрытия : справ. по применению / Ю. Д. Гамбург. – М. : Техносфера, 2008. – 359 с.
2. Orinakova, R. Recent developments in the electrodeposition of nickel and some nickel-based alloys / R. Orinakova, A. Turonova, D. Kladekova // J. of Applied Electrochem. – 2006. – Vol. 63. – P. 234–241.
3. Fritz, T. Characterization of electroplated Ni / T. Fritz, H. Cho, K. Hemker // Microsystem Technologies. – 2002. – Vol. 9. – P. 73–79.
4. Скорб, Е. В. Исследование коррозионных свойств электроосажденных композитов Ni–V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Ni–V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/MoO<sub>3</sub> методом сканирующей электрохимической микроскопии / Е. В. Скорб, Т. В. Свиридова, Д. В. Свиридов // Свиридовские чтения : сб. ст. – Вып. 5. – Минск : БГУ, 2009. – С. 89–96.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ, ПОДВЕРГШИХСЯ ЛАЗЕРНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

И. К. Губаревич

*Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Республика Беларусь*

Научный руководитель С. В. Васильев

Показана возможность применения высокочувствительных оптических методов исследования топографии поверхности металлов при их лазерной обработке для учета влияния различных внешних факторов на формирование рельефа мишени.

При выборе наиболее эффективных режимов лазерной обработки материалов, включая лазерный раскрой, перфорацию, сварку материалов, модификацию свойств их поверхности, лазерное напыление пленок, а также для разработки новых методов контроля лазерных технологических процессов необходимы исследования процессов, происходящих как в течение времени лазерного воздействия на материал, так и протекающих после прекращения внешних воздействий.

Процессы, происходящие во время воздействия на объект лазерного импульса длительностью порядка 1 мс и сразу после него, описаны в [1], [2]. Схема использованной в работе экспериментальной установки приведена в [1]. Для экспериментов

использовалось излучение рубинового лазера ГОР-100М ( $\lambda = 0,694$  мкм), работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса  $\tau \sim 1,2$  мс). Энергия лазерных импульсов  $E_0$  варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж.

Для исследования формы поверхности образовавшегося на пластине кратера использовался метод проекции полос, который в данном случае оказался более эффективным по сравнению с голографическими методами получения контуров рельефа, и стереофотограмметрическим методом, так как позволял еще на стадии проецирования полос получить картину с регулируемой чувствительностью измерений и достаточно хорошей видностью полос, контролируемых визуально. Регулирование чувствительности измерений (относительное смещение полосы) достигалось изменением периода спроецированных полос, а хорошая видность обеспечивалась изменением угла освещения исследуемой поверхности до устранения световых бликов от поверхности кратера. Данный метод детально описан в работе [3].

Для изучения изменения рельефа поверхности мишени вне зоны кратера (на нее падают капли расплавленного металла, также возможно влияние плазменного факела) чувствительности данного метода не хватает. Поэтому был предложен следующий метод исследования [4], схема которого показана на рис. 1.

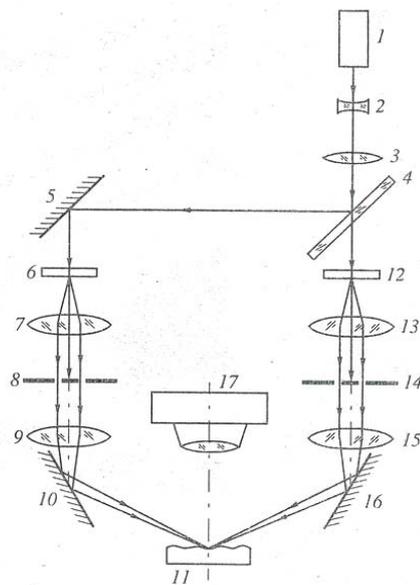


Рис. 1. Оптическая схема исследования рельефа поверхности образца в реальном времени:  
 1 – лазерный источник света; 2, 3 – телескопическая система;  
 4 – светоделитель; 5, 10, 16 – зеркала; 6, 12 – пропускающие дифракционные решетки; 7, 9, 13, 15 – объективы;  
 8, 14 – фильтрующие диафрагмы; 11 – исследуемая поверхность образца; 17 – фотоаппарат

При использовании голографического метода наблюдение муаровой картины производится в реальном времени. Использование данной методики позволяет регулировать чувствительность измерений, что видно на рис. 2. Это происходит путем изменения периода полос проецируемой картины, а также изменением угла между направлением проецирования картины и нормалью к исследуемой поверхности.

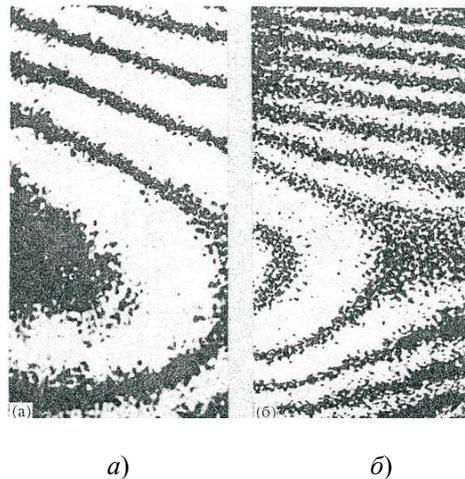


Рис. 2. Муаровые картины рельефа поверхности образца в реальном времени с различными расстояниями между соседними контурами:  
*a* – 110 мкм; *б* – 55 мкм

На рис. 2, *a* приведена муаровая картина контуров рельефа металлической пластины с небольшим отклонением формы поверхности от плоской. Картина получена в устройстве, показанном на рис. 1. Для улучшения качества полос приводилась дополнительно оптическая фильтрация пространственных частот. Расстояние между контурами рельефа поверхности составляет 110 мкм. Как видно из приведенной на рис. 2, *a* картины, чувствительность измерений недостаточна для количественной обработки картины.

На рис. 2, *б* приведена интерференционная картина контуров рельефа этой же пластины, полученная в оптическом анализаторе (рис. 3).

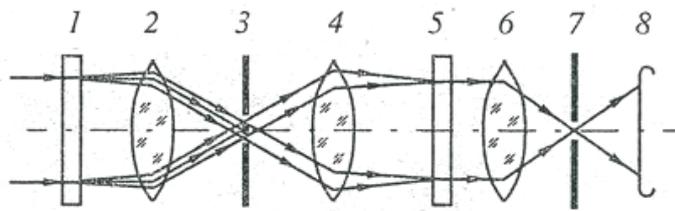


Рис. 3. Схема оптического анализатора для получения интерференционного контура рельефа поверхности с повышением чувствительности измерений:

1, 5 – фотографии спроецированных полос; 2, 4, 6 – объективы;  
 3, 7 – фильтрующие диафрагмы; 8 – плоскость наблюдения

При получении интерференционной картины выделялись в плоскости фильтрации 3 плюс и минус вторые порядки дифракции волн на фотографиях. Расстояние между соседними контурами рельефа составляет в этом случае 28 мкм, что соответствует 4-кратному повышению чувствительности измерений по сравнению с муаровой методикой визуализации формы поверхности.

Таким образом, с помощью предложенных методик была исследована как зона лазерного разрушения, так и зона, не подвергающаяся непосредственному лазерному воздействию.

## Литература

1. Васильев, С. В. Влияние электрического поля на приповерхностные процессы при лазерной обработке материалов / С. В. Васильев, А. Ю. Иванов // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 2. – С. 170–174.
2. Влияние давления фонового газа на качество лазерной обработки металлов / С. В. Васильев [и др.] // Весн. ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 89–100.
3. Васильев, С. В. Оптическая визуализация топографии кратера, образующегося при действии лазерного импульса на твердый образец / С. В. Васильев, А. Ю. Иванов, А. М. Ляликов // Квантовая электроника. – 1993. – Т. 20, № 6. – С. 616–618.
4. Губаревич, И. К. Визуализация формы поверхности в реальном времени с регулированием чувствительности измерений / И. К. Губаревич, А. М. Ляликов // Оптика и спектроскопия. – 1996. – Т. 80, № 6. – С. 948–952.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ИСКУССТВЕННО  
НАНЕСЕННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ  
НЕПРЕРЫВНО-ЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СОРТОВОГО ПРОКАТА**

**И. А. Панковец**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель М. Н. Верещагин

На ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» для производства продукции сортопрокатного стана 370/150 используется непрерывно-литая заготовка (НЛЗ) собственного производства номинальным сечением  $250 \times 300$  мм. Несмотря на высокую технологическую дисциплину выплавки, разливки стали, нагрева и проката, встречаются дефекты поверхности, которые выявляются при контроле качества готового сорта ультразвуковыми установками.

Дефекты поверхности на готовом сорте могут иметь как сталеплавильное, так и прокатное происхождение. Каждому дефекту присущи свои характерные морфологические и генетические признаки, которые выявляют в процессе проведения металлографических исследований. В ряде случаев признаки, определяющие происхождение дефектов, могут иметь схожие черты. Кроме того, на них накладывается влияние нагрева и механизма прокатки – калибровка, кантовка и другие факторы.

Проблема разделения брака металлопродукции неизменно вызывает много споров между сталеплавильным и прокатным цехами о причинах дефектов и их виновниках. В каждом конкретном случае необходимы достаточные аргументы для того, чтобы определить природу дефекта, установить его причину и разработать рекомендации по устранению и предупреждению несоответствующей продукции.

Для обоснованного разделения брака между переделами в условиях стана 370/150 проведено исследование по трансформации дефектов на поверхности НЛЗ при прокате на линии прутка путем металлографической экспертизы искусственно нанесенных дефектов – методики «меченых» дефектов, являющейся наиболее надежным и оправданным путем, позволяющим изучить трансформацию дефектов при прокатке.

**Материал для исследования.** В качестве опытного для исследования был выбран блюм сечением  $250 \times 300$  мм марки стали 42CrMo4 длиной 4000 мм. Блюм был подвергнут зачистке абразивным способом всей поверхности на глубину 2 мм для исключения влияния поверхностных дефектов сталеплавильного производства на конечный результат. Дефекты на поверхность блюма наносились абразивным инструментом согласно схеме (рис. 1 и 2). Краткое описание нанесенных дефектов приведено в табл. 1. Глубина всех нанесенных дефектов составила от 9 до 11 мм.