

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ИЗДЕЛИЯ НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА Х10Р4Г2С

Г. В. ПОХМУРСКАЯ<sup>1</sup>, М. М. СТУДЕНТ<sup>2</sup>, А. А. ВОЙТОВИЧ<sup>3</sup>, А. З. СТУДЕНТ<sup>2</sup>, А. Р. ДЗЮБИК<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Технический университет, г. Хемнитц, 09107. E-mail: pokhmurska@mb.tu-chemnitz.de

<sup>2</sup>Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, 79601, г. Львов, ул. Научная, 5.  
E-mail: student-m-m@ipm.lviv.ua

<sup>3</sup>Национальный университет «Львовская политехника». 79013, г. Львов, ул. Степана Бандеры, 12.  
E-mail: andrsibox@gmail.com

В работе представлены результаты исследований влияния высокочастотных (100 Гц) механических колебаний на микроструктуру и износостойкость металла, наплавленного проволокой ПП Х10Р4Г2С под флюсом ОСЦ 45М. Установлено, что при использовании горизонтальной вибрации в структуре преобладает твердый раствор наплавленного металла, равномерно насыщенный мелкодисперсными железохромистыми боридами (FeCr)B. Гомогенность структуры способствует повышению износостойкости в 2,0...2,5 раза. Библиогр. 9, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* наплавка, порошковая проволока, вибрация, микроструктура, долговечность, характер износа

Из проведенных ранее исследований установлено, что форма и размеры карбидных включений влияют на работоспособность наплавленного металла [1]. Наплавки порошковыми проволоками (ПП) системы Fe–Cr–B–C заэвтектического состава характеризуются выделением в микроструктуре карбоборидных дендритных осей первого и второго порядков [2–4]. Остроконечная форма твердых включений, однако, является источником концентрации напряжений, от которых происходит зарождение микротрещин, что, в свою очередь, приводит к снижению несущей способности наплавленного металла. Также ранее [5, 6] установлено, что при наличии вибрации в процессе наплавки существенно повышаются как механические характеристики металла шва, так и его износостойкость [7, 8]. Цель данного исследования — оптимизировать амплитуду механических колебаний подложки в процессе наплавки для обеспечения высоких значений твердости и износостойкости наплавленного металла.

Наплавленные слои формировали на подложке из низкоуглеродистой стали СтЗсп под слоем флюса ОСЦ 45М (состав в мас. %: 44 SiO<sub>2</sub>, 44 MnO, < 2,5 MgO, 6...9 CaF<sub>2</sub>, < 6,5 CaO, < 2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, < 0,15 S, < 0,15 P) с использованием порошковой проволоки ПП Х10Р4Г2С. Диаметр ПП составлял 2,6 мм, коэффициент заполнения 25 %.

Наплавляли образцы размером 300×150×10 мм. Их горизонтальную или вертикальную вибрацию осуществляли с частотой 100 Гц при амплитуде 70 и 300 мкм. Горизонтальную вибрацию осуществляли поперек наплавленного валика. Перед на-

плавкой сварочные материалы просушивали при температуре 250 °С в течение 2,5 ч. Наплавляли валики с использованием подвесной головки АБС с источником питания постоянного тока (генератор ПСО 500). Параметры наплавки: ток 420 А, напряжение дуги 30...32 В, скорость подачи ПП 73 м/ч, скорость перемещения дуги 21 м/ч, перекрытие валиков 30 %.

Фазовый анализ выполняли на рентгеновском дифрактометре D8 Discover с использованием Co-излучения. Микроструктуру исследовали на электронном микроскопе EVO 40 XVP. Для количественной оценки размеров структурных составляющих в наплавленных слоях использовали программное обеспечение Axio Visio, сравнили площадь включения с единичной площадью шлифа в продольной плоскости.

Модуль упругости измеряли динамическим индентированием, нагрузка 50 г. Также выполнен скретч-тест (глубина внедрения, тангенциальная сила) — нагрузка 40 г, время выдержки под нагрузкой 40 с, длина царапины 956 мкм. Направление сканирования — поперек валика.

Износостойкость наплавленных слоев при абразивном износе незакрепленным абразивом оценивали согласно ГОСТ 23.208–79. В частности, просушенный кварцевый песок с размером частиц 200...1000 мкм непрерывно подавали в зону контакта резинового диска с образцом. Скорость трения составляла 0,3 м/с, а усилие его прижатия к образцу 2,4 кН. Для определения износа наплавленного слоя закрепленным абразивом использовали абразивный круг СМ-2 на керами-

ческой связке. Линейная скорость трения составляла 0,8 м/с, нагрузка в зоне линейного контакта 1,5 кН. Длина испытательного пути 720 м. Ударный износ оценивали при силе удара 12 кДж шариком диаметром 25 мм из стали ШХ 15, который падал на исследуемую поверхность с частотой 40 с<sup>-1</sup>. Продолжительность эксперимента 3600 с. Потерю массы образцов определяли с точностью до 2·10<sup>-4</sup> г на электронных весах.

**Результаты и их обсуждение.** В составе наплавленных слоев, полученных без применения вибрации, выявили такие фазы как феррохром (FeCr), ферробор (Fe<sub>2</sub>B) и железохромистый борид (FeCr)B [9] (рис. 1).

Металлографические исследования показали, что вибрация влияет на размеры и форму твердых включений. На гребнях валиков, сформированных без вибрации, размер площади одиночных включений фазы (FeCr)B составляет 10...150 мкм<sup>2</sup> (рис. 2, а). Наплавка образцов с использованием вертикальной вибрации при амплитуде 300 мкм уменьшила размеры (рис. 2, б) боридов (FeCr)B, разброс их площади составил 10...30 мкм<sup>2</sup>. Использование в процессе наплавки горизон-

тальной вибрации показало, что заэвтектические структурные составляющие измельчаются еще существеннее. В частности при максимальной амплитуде 300 мкм четко зафиксировали существенное измельчение железохромистых боридов (FeCr)B, размер площади их одиночных включений составил 2...5 мкм<sup>2</sup> (рис. 2, в). Кроме того, при горизонтальной вибрации образца, в микроструктуре наплавленного слоя обнаружили формирование матричной фазы FeCr в виде неравноосных зерен (рис. 1, з, д). При амплитуде колебаний 70 мкм их ширина и длина на гребнях валиков составляла 10...40 мкм (рис. 1, з), а при амплитуде 300 мкм, эти размеры уменьшились до 5...30 мкм (рис. 1, д). Наличие незначительного количества матричных зерен FeCr без включений позволяет релаксировать напряжения, возникающие при последующей эксплуатации наплавленного металла (рис. 2).

Для оценки механических характеристик металла, наплавленного при дополнительной вибрации, провели его динамическое индентирование. Установлено, что наибольшее сопротивление проникновению индентора хорошо согласуется с мелкозернистой микроструктурой на гребне валика и

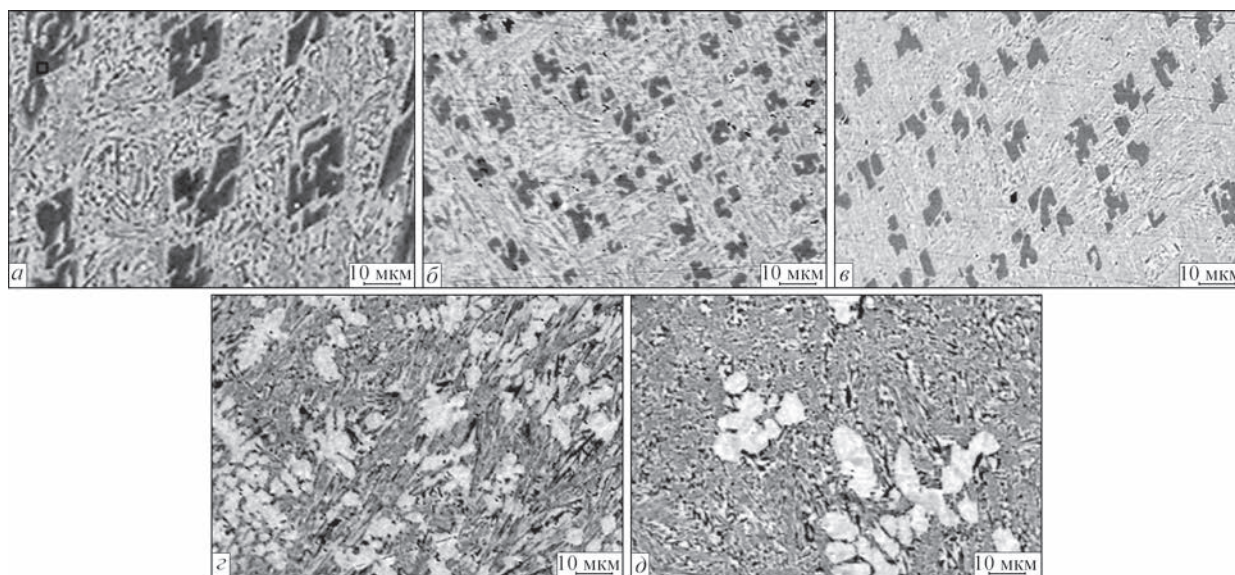


Рис. 1. Микроструктура на гребне валика наплавленного металла проволокой ПП Х10Р4Г2С: а — без вибрации; б, в — при вертикальной, з, д — при горизонтальной вибрации; при значении амплитуды 70 мкм (б, з), 300 мкм (в, д)

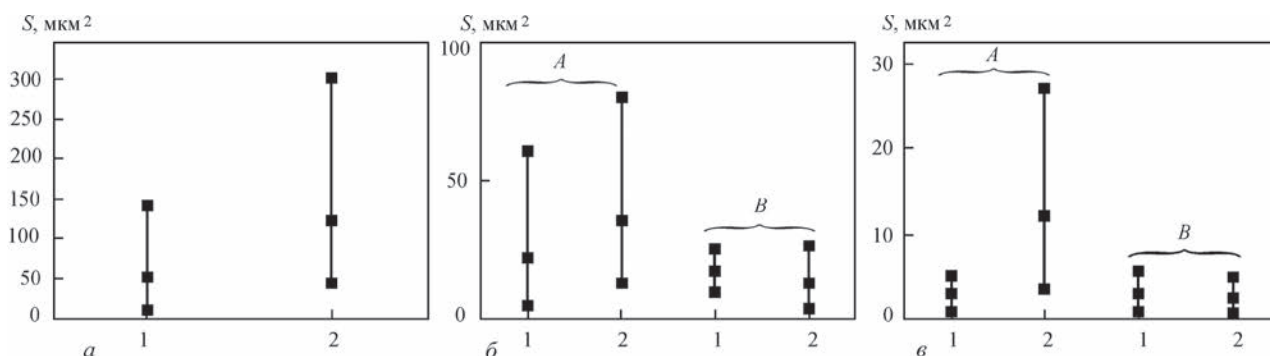


Рис. 2. Изменение площади S включений (1,6Fe + 0,4Cr)B; а — без вибраций; б, в — при вертикальной и горизонтальной вибрации: 1 — на гребне валиков; 2 — в зоне их перекрытия; А, В — при амплитуде 70 и 300 мкм, соответственно

Износ образцов с наплавленными слоями, г

Показатель	Без вибрации	Горизонтальная вибрация		Вертикальная вибрация	
	Амплитуда, мкм				
	0	70	300	70	300
Износ при закреплённом абразиве	0,035	0,030	0,015	0,10	0,150
Износ при незакреплённом абразиве	0,020	0,015	0,01	0,045	0,035
Износ при ударе	0,009	0,0005	0,0007	0,005	0,004

высокой плотностью твердых частиц (FeCr)В. Кроме того, при горизонтальной вибрации амплитудой 300 мкм модуль упругости составил 331 ГПа, что значительно выше, чем значение, полученное на образцах, наплавленных с использованием вертикальной вибрации (297 ГПа), и без ее использования (295 ГПа). Этот результат может свидетельствовать о влиянии механических колебаний на уровень пористости наплавленного металла. Ведь, если принять во внимание значения модуля упругости, то при максимальной амплитуде горизонтальной вибрации плотность металла оказалась наивысшей. Это подтверждается также силой противодействия материала (тангенциальное усилие) при прохождении индентора (скретч-метод) вдоль гребня валика. Сохраняется тенденция увеличения сопротивления разрушению наплавленного металла с повышением амплитуды горизонтальной вибрации, а при вертикальной вибрации – она наоборот уменьшается. Большой разброс значений тангенциальной силы свидетельствует о низком сопротивлении разрушению наплавленного металла в условиях резания при наличии в микроструктуре мелких частиц 10...30 мкм<sup>2</sup> железохромистых боридов в наплавленных слоях при максимальной амплитуде вертикальной вибрации. В наплавленных слоях, полученных без использования вибрации, разброс значений тан-

генциальных усилий несколько меньше, чем в наплавленном металле при вертикальной вибрации. Это свидетельствует о том, что в условиях резки больший размер площади (10...150 мкм<sup>2</sup>) твердых включений оказывает положительный эффект. При горизонтальной вибрации амплитудой 300 мкм разброс значений тангенциальной силы наименьший вследствие высокой степени гомогенизации твердого раствора и небольших размеров твердых включений. При продвижении к зоне перекрытия наплавленных слоев величина силы сопротивления разрушению материала увеличивается (таблица).

Кроме того, была проведена оценка воздействия вибрации в процессе наплавки на износостойкость металла по потере массы образцов вследствие износа наплавленной поверхности закреплённым и незакреплённым абразивом, а также в условиях ударных нагрузок. При испытании закреплённым абразивом установлено, что для образцов, наплавленных без применения вибрации, потеря составила 0,035 г, а при горизонтальной вибрации амплитудой 70 и 300 мкм — 0,03 и 0,015 г соответственно. Однако при вертикальной вибрации образцов с увеличением амплитуды колебаний потери массы возросли (см. таблицу). Характер повреждений наплавленных слоев после трения также хорошо согласуется с полу-

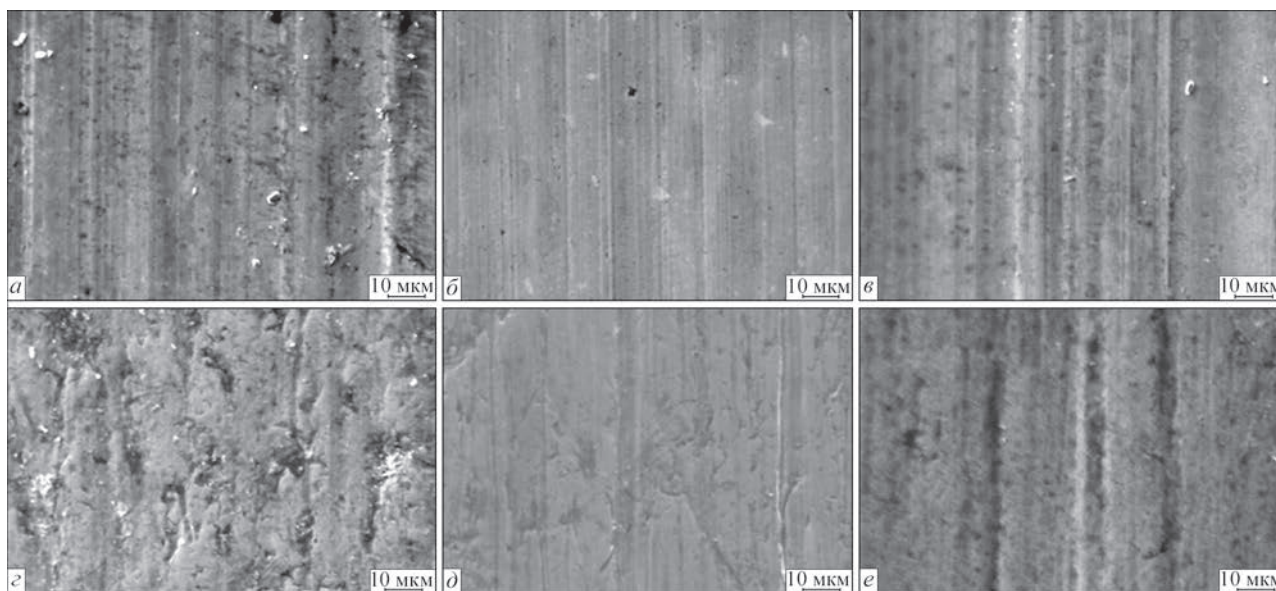


Рис. 3. Морфологические особенности поверхностей трения при износе во время испытаний с закреплённым (а–с) и незакреплённым (г–е) абразивом наплавленного металла проволокой ПП Х10Р4Г2С без применения вибрации (а, г) и с горизонтальной (б, д) и вертикальной (в, е) вибрацией образцов при амплитуде 300 мкм

ченными результатами весового износа. Так, при износе закрепленным абразивом на поверхности трения, полученной без применения вибрации, обнаружены довольно глубокие параллельные канавки и следы от выкрошившихся боридов (FeCr)B (рис. 3, а). Вследствие трения они легко растрескивались на части и устранились из пятна контакта, оставляя после себя глубокие канавки. Таким образом, это обусловило низкое сопротивление износу наплавленного металла.

При горизонтальной вибрации амплитудой 300 мкм на поверхности зоны контакта металла с абразивным кругом практически отсутствуют хрупкие сколы от выкрашивания заэвтектических боридов (рис. 3, б). Однако на поверхности наплавленного слоя наблюдались неглубокие, неравномерно распределенные следы трения. Это хорошо согласуется с неравномерностью изменения микротвердости наплавленного металла и наличием в структуре зерен мягкой ферритной матрицы. Последняя способствует релаксации напряжений в зоне контакта и, таким образом, предотвращает выкрашивание твердых боридов, которые и вызывают глубокие повреждения поверхности трения.

В случае наплавки с использованием вертикальной вибрации на поверхности трения обнаружены глубокие и широкие параллельные следы износа, а также следы выкрашивания заэвтектических боридов (рис. 3, в). Вероятно, с этим связано постоянное наращивание износа через углубление канавок частицами боридов, которые в этом случае выполняли роль микрорезцов. Благодаря системной ориентированности боридов в направлении трения, по мере углубления круга из эвтектической матрицы постепенно высвобождаются новые бориды. В этом случае они оказывают отрицательное воздействие на износ из-за режущего эффекта. При испытании незакрепленным абразивом слоев, наплавленных без применения вибрации, основным механизмом износа становится выкрашивание твердых боридов (рис. 3, г). Причем незакрепленный абразив в значительной степени способствует этому выкрашиванию. Однако выкрошенные бориды практически не оставляют на поверхности характерных параллельных следов трения. Вероятно, жесткость резинового круга недостаточна для создания необходимого усилия прижатия абразива к наплавленной поверхности. Как результат, отколотые части боридов вместе с кварцевым песком устранились из зоны трения и перестают влиять на процесс износа. Использование горизонтальной вибрации при наплавке способствует выделению в структуре металла включений железохромистых боридов (FeCr)B. Они плотно закреплены в ферритной матрице FeCr и это затрудняет их удаление. Поэтому износ снижается, а на поверхности наблюдаются неглубокие выбоины

от включений феррохромистых боридов и лишь кое-где образованные ими канавки.

Исследование влияния вертикальной вибрации на износ незакрепленным абразивом показало, что ее негативное воздействие сохраняется. Поверхность износа наплавленных слоев при амплитуде колебаний 300 мкм характеризуется многочисленными следами выкрашивания твердых боридов. Вследствие локального режущего эффекта, они оставляют относительно глубокие бороздки на поверхности трения (рис. 3, е). Вместе с тем, если сравнить рельефы поверхностей износа наплавленных слоев без применения вибрации и после вертикальной вибрации, то становится очевидным, что определяющим признаком износа является не глубина канавок от трения в зоне контакта круга с металлом, а площадь следов и сопротивление откалыванию заэвтектических боридов от эвтектической матрицы. При этом, чем больше по размерам бориды и меньше сопротивление их откалыванию от матрицы, тем интенсивнее износ наплавленного металла при испытании незакрепленным абразивом (рис. 4).

Также в работе проанализирован характер повреждений на поверхностях гребней валиков в процессе ударных испытаний. В металле, наплавленном без вибрации, зафиксированы существенные повреждения на поверхности гребней (рис. 4, а–в), которые начинались в результате пластической деформации. Из-за нарушения когезивной связи между твердыми боридами и пластичной матрицей происходило выкрашивание сначала крупных, а затем и мелких боридов от поверхности, а затем отдельных частей матрицы FeCr (рис. 4, а).

Напряжения, возникающие в окрестности вершин концентраторов, образованных (FeCr)B-включениями, были вполне достаточными для зарождения трещин. Возможно, что такие же трещины могут распространяться также и в глубину наплавленного слоя, поскольку твердость наплавленного материала составила  $HRC\ 55...57$ . По мере увеличения продолжительности испытаний плотность расположения следов от ударов шарика на поверхности наплавленного шара увеличивалась. При этом перегородки между ближайшими ямками разрушались, освобождая из матрицы большие бориды (FeCr)B (рис. 4, б). На этом этапе в разрушении начинали участвовать мелкие бориды  $Fe_2B$ , нарушение когезивной связи которых с матрицей создавало в наплавленном слое мелкие поры, которые способствовали постепенному дальнейшему износу металла (рис. 4, в). При этом глубокие, четко очерченные язвы на изношенных поверхностях гребней валиков, свидетельствуют об избирательности процесса изнашивания и об его привязке к большим по размерам боридам.

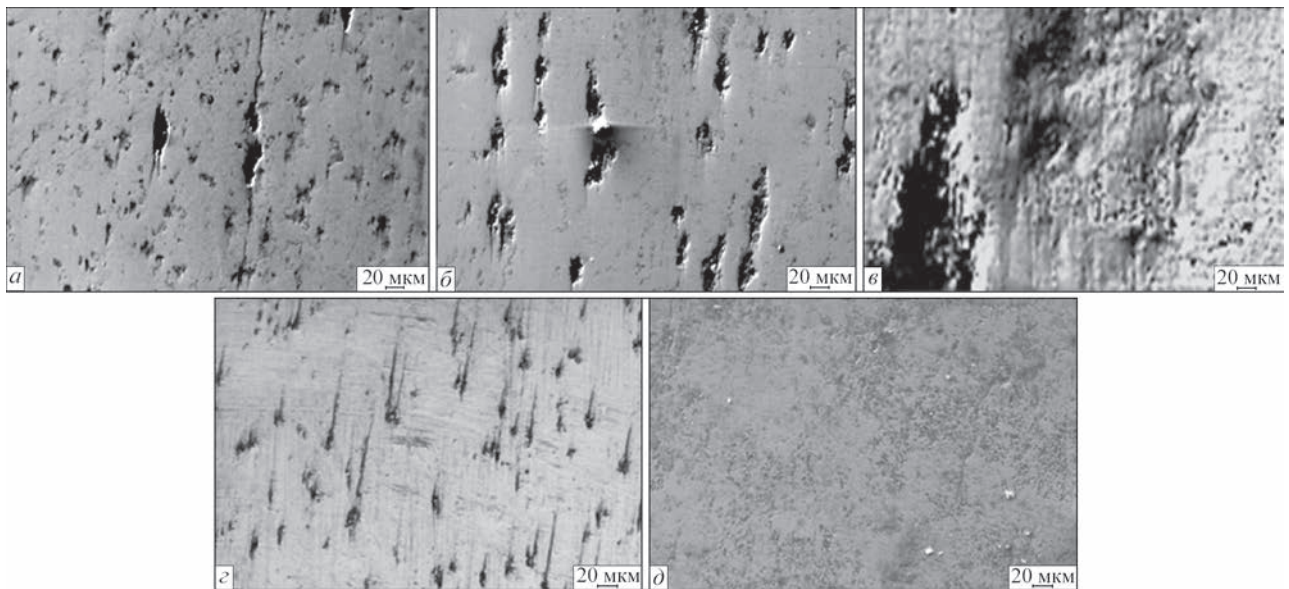


Рис. 4. Морфологические особенности поверхностей в условиях приложения ударных нагрузок: *a–в* — без вибрации; *г, д* — при вертикальной вибрации; *г, д* — при амплитуде колебания 70 и 300 мкм, соответственно

Данные о потере массы образцов после ударного износа свидетельствуют о том, что использование вибрации в процессе наплавки повышает сопротивление износу наплавленных слоев (таблица). Проанализировали особенности ее влияния на повреждения на поверхности наплавленного металла. Поскольку при использовании вертикальной вибрации с невысокой амплитудой 70 мкм разброс площади железохромистых боридов существенно уменьшился (10...60 мкм<sup>2</sup>) (см. рис. 2, б), то износ поверхности на гребне валиков происходил по такому же механизму, как и без применения вибрации. При этом возросла локальность износа, так как выкрашивались бориды меньших размеров, сцепление которых с матрицей существенно сильнее. Следует отметить ориентированность лент из язв, вызванных выкрашиванием боридов, поперек наплавленных валиков, что связано с направлением отвода тепла во время застывания ванны расплава. Так как растрескивание это действенный способ релаксации напряжений в наплавленном слое, то перемишки между этими язвами легко разрушались (рис. 4, г). Однако основной вклад в износ внесли не трещины, а выкрошившиеся бориды. При использовании в процессе наплавки вибрации площадь боридов на единичной площади шлифа существенно меньше (см. рис. 2, б). Поэтому величина потерь от износа также должна уменьшиться. Это согласуется с результатами определения величины износа весовым методом (таблица).

С увеличением амплитуды вертикальной вибрации до 300 мкм на гребне валиков обнаружены признаки общего, сравнительно неглубокого износа (рис. 4, д). Это следствие диспергирования упрочняющей фазы Fe<sub>2</sub>V. Лишь иногда наблюда-

ли элементы локального износа с растрескиванием, но эти фрагменты не имели определяющего значения. Как особенность отметили потерю ориентированности дефектов, которую наблюдали при использовании других условий наплавки. Это затрудняет рост трещин при разрушении перемишек между язвами и свидетельствует о сильной когезии износостойких фаз с матрицей.

При использовании горизонтальной вибрации изменилось фазовое состояние и морфология структуры наплавленного слоя. Появились округлые зерна FeCr и дисперсные твердые частицы железохромистых боридов (FeCr)V. Такая структурно-фазовая композиция качественно меняет характер воздействия ударных нагрузок. Определя-

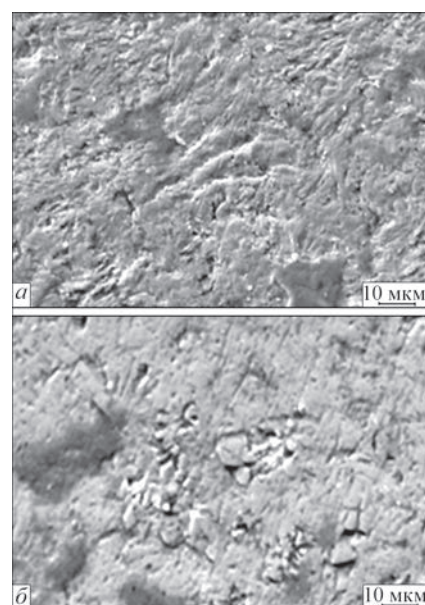


Рис. 5. Морфология поверхности износа на гребне валиков в слоях, наплавленных проволокой ПП Х10Р4Г2С, при горизонтальной вибрации амплитудой: *a* — 70; *б* — 300 мкм

ющим фактором, ответственным за износ металла на гребнях валиков, становится способность наплавленного слоя пластически деформироваться, релаксировать напряжения, возникающие при испытании на ударный износ. Следы пластического деформирования матрицы наплавленного металла являются характерным признаком рельефа его поверхности после испытаний (рис. 5, а, б). На примере рельефа валика видно, как на более поздних этапах износа в результате пластического деформирования поверхности наплавленного металла происходит отслаивание его тонких слоев (рис. 5, а). Поскольку под ними наблюдали следы от мелких включений, то можно сделать вывод, что причиной этого является потеря когезивной связи мелких включений с матрицей с последующим отслоением наклепанного поверхностного слоя от основания (рис. 5).

Износ наплавленного металла, полученного при амплитуде горизонтальной вибрации 300 мкм, происходит по такому же механизму, как и при меньшей амплитуде вибрации. Но при этом уменьшается количество и растет локальность участков, откалыванию которых способствует пластическая деформация (рис. 5, б). Это свойственно металлу на гребне валиков и связано с невысокой плотностью пластической фазы FeCr и высокой дисперсностью твердой фазы (1,6Fe + 0,4Cr) В (сечение составляет 1...5 мкм<sup>2</sup>). Следует отметить также самую низкую из всех рассматриваемых вариантов формирования наплавки склонность поверхностных слоев к растрескиванию.

Следовательно, поверхностный слой металла, полученный с использованием горизонтальной вибрации, характеризуется высокой способностью к релаксации напряжений путем пластического деформирования и низкой склонностью к растрескиванию. Этим объясняется его высокое сопротивление износу при ударных испытаниях, которое достигается в результате структурно-фазовых превращений, изменения морфологии, а также размеров упрочняющих фаз в структуре наплавленного металла.

## Выводы

Исследована микроструктура слоев, наплавленных порошковой проволокой ПП Х10Р4Г2С, выполненных автоматическим способом под слоем флюса ОСЦ 45М, с использованием вертикальной и горизонтальной вибрации при частоте 100 Гц и амплитуде колебаний 70, 300 мкм. Использование вибрации в процессе наплавки обеспечило измельчение и округление упрочняющей фазы (Fe Cr)В.

Установлено, что наплавленные в условиях горизонтальной вибрации слои при амплитуде 300 мкм в зоне гребней валков, характеризуются высокой способностью к релаксации напряжений путем пластического деформирования поверхностных слоев и низкой склонностью к растрескиванию, что объясняет их высокое сопротивление износу при ударных испытаниях.

1. Influence of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition on microstructure and wear resistance of Fe–Cr–C cladding formed by arc surface welding / Y. Zhou, Y. Yang, X. Qi [et al.] // Journal of rare earths. – 2012. – Vol. 30, № 10. – P. 1069.
2. Yuksel N. Wear behavior–hardness–microstructure relation of Fe–Cr–C and Fe–Cr–C–B based hardfacing alloys / N. Yuksel, S. Sahin // Materials and Design. – 2014. – 58. – P. 491–498.
3. Erosive wear of hardfaced Fe–Cr–C alloys at elevated temperature / C. Katsicha, E. Badisch, R. Manish [et al.] // Wear. – 2009. – 267. – P. 1856–1864.
4. Вплив вібрації під час наплавлення захисного шару на його мікроструктуру та ударно-абразивне зношування / Г. В. Похмурська, М. М. Студент, О. С. Ланець [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – Вип. № 3.
5. Effect of vibratory welding process to improve the mechanical properties of butt welded joints / P. Govindarao, P. Srinivasarao, A. Gopalakrishna [et al.] // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). – 2012. – Vol. 2, Is.4, July-Aug. – P. 2766–2770.
6. Husein A. R. Improvement of mechanical welding by using induced harmonic vibration / A. R. Husein, N. A. Abdul, R. A. Talib // Journal of Applied Sciences. – 2011. – № 11(2). – P. 348–353.
7. Improving microstructure and wear resistance of plasma clad Fe-based alloy coating by a mechanical vibration technique during cladding / S. Wanga, H. Li, X. Chenb [et al.] // Materials Science and Engineering. – 2010. – № A 528. – P. 397–401.
8. Влияние вибрации детали в процессе наплавки на структуру и свойства металла / Ч. В. Пулька, О. Н. Шаблий, В. С. Сенчишин [и др.] // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – P. 27–29.
9. Особливості формування та руйнування наплавлених шарів з порошкових дротів системи Fe–Cr–B–C за ударних навантажень / А. А. Войтович, Г. В. Похмурська, М. М. Студент [та ін.]. // Проблеми трибології. – 2015. – № 4. – С. 114–123.

Поступила в редакцию 11.03.2016

## IX конференция «Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы»

25–26 ноября 2016 г.

г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

E-mail: office@paton.kiev.ua; тел.: (044) 205-20-06, 205-17-10