

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-11-294-18-24

О. Л. Первухина, д-р техн. наук, И. В. Денисов, канд. техн. наук, Л. Б. Первухин, д-р техн. наук***ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЯ В ЗОНЕ РЕМОНТА СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛИТ СТАЛЬ-ТИТАН***ИСМАН им. А. Г. Мерджанова РАН, г. Черноголовка, opervukhina@mail.ru***ООО «Битруб Интернэшнл», г. Красноармейск, bitrub@mail.ru*

В работе изучены микроструктуры в сварном соединении плакирующего слоя из титана, полученные путём повторного плакирования сваркой взрывом дефектов сплошности соединения слоёв, возникших в процессе изготовления плит биметаллических сталь-титан сваркой взрывом. При удалении титана из зоны дефекта в плакирующем слое выполняется переходная зона под углом от поверхности стали. Показано, что структура соединения определяется, образующимся на скосе углом соударения и направлением истечения ударно сжатого газа из сварочного зазора. Выявленные особенности структуры показывают, что для получения качественного соединения на кромках нужно выполнять угол скоса так, чтобы получить теоретический угол соударения больше минимального и меньше максимального (однако, минимально возможный в начале процесса образования соединения).

Ключевые слова: сварка взрывом, дефекты, структура*O. L. Pervukhina, I. V. Denisov, L. B. Pervukhin****FEATURES OF THE STRUCTURE OF THE CONNECTION IN THE REPAIR ZONE OF EXPLOSION WELDING OF CONTINUITY DEFECTS OF BIMETALLIC PLATES STEEL+TITANIUM***Merzhanov Institute of Structural Macrokinecs and Materials Science RAS,**Chernogolovka, opervukhina@mail.ru***Bitrub International, Krasnoarmeysk, bitrub@mail.ru*

The paper studies microstructures in a welded joint of a titanium cladding layer. This joint was obtained by repeated cladding by explosion welding of defects that arose during the manufacturing of bimetallic plates "steel + titanium" by explosion welding. When removing titanium from the defect zone in the cladding layer, the transition zone was ground at an angle to the steel surface. It is shown that the structure of the welded joint is determined by the impact angle at the bevel section and the direction of the outflow of shock-compressed gas from the welding gap. The revealed structural features help to select the bevel angle to obtain a high-quality connection when repairing defects by explosion welding. The bevel angle on the edges should be ground so as to obtain a theoretical impact angle greater than the minimum and less than the maximum welding angle (however, the minimum possible welding angle at the beginning of the explosion welding process).

Keywords: explosion welding, defects, structure

При производстве плит биметаллических сталь-титан сваркой взрывом возможно образование локальных дефектов сплошности даже при отработанной технологии. В работе [1] исследована возможность ремонта дефектов сплошности биметаллических плит сталь-титан сваркой взрывом. Показано, что основная задача технологии ремонта: получить при повторном плакировании гомогенный плакирующий слой титана по всей площади плиты, то есть обеспечить прочное соединение не только титана со сталью, но и титана с титаном за пределами

дефекта, то есть в переходной зоне. Для этого в [1] слой титана в дефектной зоне выбирался до стали, производится капиллярная дефектоскопия по границам дефекта и выполняется переходная зона в плакирующем слое плиты с определённым углом α . В процессе сварки взрывом угол соударения и сварочный зазор будут переменными. Следовательно, будут переменными кинематические параметры (угол и скорость соударения, рис. 1 а, б) и параметры ударно сжатого газа (давление, плотность и скорость исте-

чения), которые определяют качество и структуру соединения.

Переходная зона в биметалле после повторного плакирования и удаления излишка восстановленного титанового слоя будет иметь вид, представленный на схеме

(рис. 1, в, г). Таким образом, важными положениями схемы повторного плакирования являются меняющиеся условия сварки взрывом за счет изменения угла соударения из-за наличия скосов, выполненных в плакирующем листе вокруг дефекта. Капилляр-

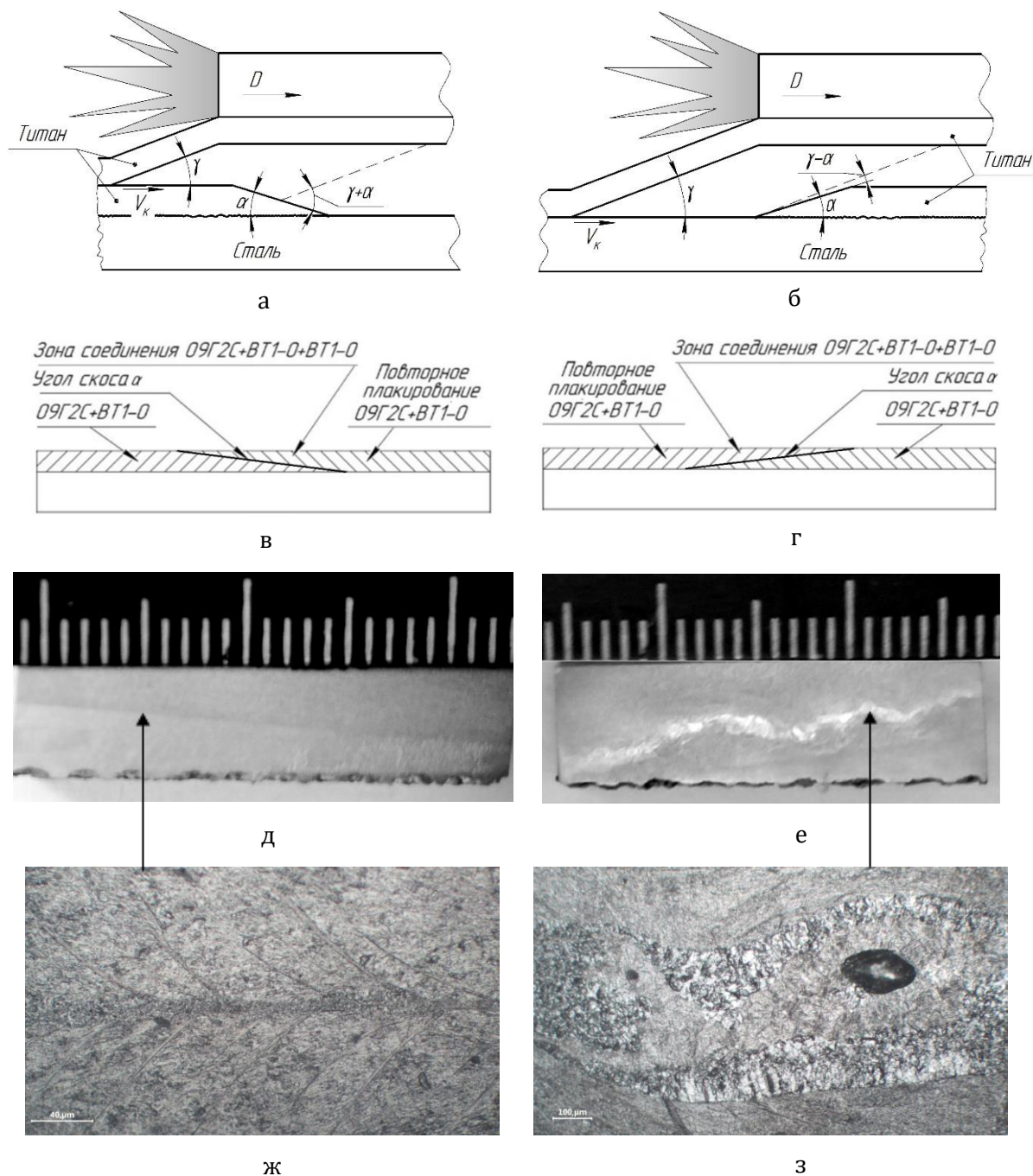


Рис. 1. Схема процесса соударения при ремонте дефекта сваркой взрывом: точка контакта набегает на скос: при спуске (а) и при подъёме (б), после повторного плакирования и удаления излишек восстановленного титанового слоя (в, г). Макроструктура сварного соединения на участке при спуске под углом $\gamma+\alpha$ (д) и при подъёме под углом $\gamma-\alpha$ (е), микроструктура сварного соединения на участке при спуске под углом $\gamma+\alpha$ (ж) и при подъёме под углом $\gamma-\alpha$ (з)

ной дефектоскопией по границам «заплатки» не выявлено неприваров, трещин и дефектов сплошности [1].

В данной работе поставлена цель исследовать особенности структуры соединения титана с титаном, образующейся в переходной зоне на участках, имеющих угол скоса, при повторном плакировании с минимальным и максимальным углами соударения.

Методика исследований.

В плите биметаллической марки 09Г2С+ВТ1-0 был выявлен дефект сплошности соединения, ремонт которого был произведен повторным плакированием сваркой взрывом. При выборке дефекта была образована переходная зона в плакирующем слое плиты под углом 7 градусов. Соединение при сварке взрывом в этой зоне происходило между слоем титана (плакировка) и листом титана («заплатка») одной марки. Расчётный режим сварки взрывом при повторном плакировании следующий: скорость точки контакта 2650 м/с, скорость соударения 630 м/с, угол соударения 14 градусов, толщина титана 5,5 мм, сварочный зазор над поверхностью плиты был 6 мм, а в зоне приварки «заплатки» 5,5 мм. Размеры плакирующего листа из титана ВТ1-0 были на 200 мм больше размеров выбранного дефекта сплошности.

Образцы для исследований отбирали из темплетов, вырезанных из переходной зоны на скосе кромок: в зоне соединения титана с титаном, соответствующих условиям максимального (21 град.) (рис. 1, в) и минимального (7 град.) углов соударения (рис. 1, г). Для точного определения границ промежуточной зоны соединения ВТ1-0+ВТ1-0 торцы темплетов были механически обработаны, далее из них вырезали образцы для исследований. Методика предусматривала определение фактического угла скоса по макроструктуре границы соединения титана с титаном на скосах, исследование макро и микроструктуры на оптическом микро-

скопе и измерение микротвёрдости отдельных структурных составляющих в зоне соединения.

Результаты исследований и обсуждение

На рисунке 1 д, е представлены макроструктуры границы титанового слоя между плакирующим слоем из титана и «заплаткой» из титана, полученные при повторном плакировании сваркой взрывом (на схеме рис. 1 в, г граница отмечена жирной линией). Микроструктура границы представлена ниже на рисунке 2 ж, з.

Структуры границ на спуске и подъёме существенно различны.

Как видно из схемы рисунке 1 а угол соударения γ в процессе сварки на участке скоса при спуске возрастает до $\gamma + \alpha$ (пунктирная линия на схеме). Согласно измерениям, проведенным на шлифе после сварки (рис. 1, в) максимальный угол соударения, будет $14 + 7 = 21$ градусов. Сварное соединение имеет плоскую границу раздела, что характерно для начальных участков сварки взрывом. Зона соединения титановых листов представляет собой полосу мелкозернистой структуры шириной 0,010- 0,025 мм (рис. 2, – структура 1). Микротвёрдость в этой зоне составляет 180-220 HV. Полоса с мелкозернистой структурой окружена металлом со следами пластической деформации в виде полос адиабатического сдвига, расположенных под углом 30-40 градусов. к границе соединения (рис. 2 – структура 2). Полосы адиабатического сдвига состоят из зёрен диаметром 0,1- 0,2 мкм, ориентированных в одном направлении. Микротвёрдость титана в этой зоне составляет 170-200 HV. Между полосами адиабатического сдвига при удалении от границы в отдельных зернах титана появляются двойники (рис.2 – структура 3). С удалением от полосы мелкозернистой структуры микротвёрдость понижается и на расстоянии 0,3-0,5 мм от неё становится равной микротвёрдости ос-

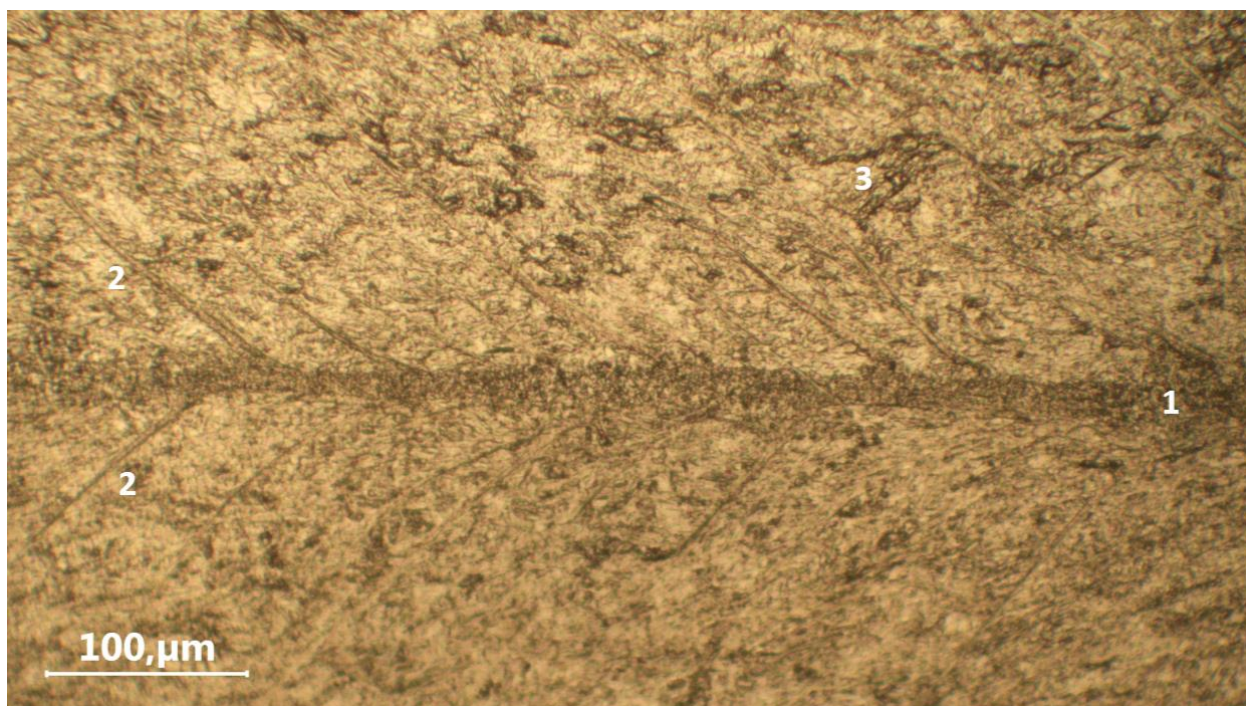


Рис. 2. Микроструктура границы сварного соединения (1) и околошовная зона с полосами адиабатического сдвига (2), двойники в зернах (3)

новного металла. Отсутствие расплава и наличие в зоне соединения полосы металла с мелкозернистой структурой, свидетельствует о прохождении процесса динамической рекристаллизации [2]. Отметим, что толщина границы в среднем 10 мкм, однако, с учетом околошовной зоны с полосами адиабатического сдвига, область сварки имеет ширину около 1000 мкм.

Как видно из схемы рис. 1 б угол соударения γ в процессе сварки на участке скоса при подъёме уменьшается до $\gamma-\alpha$ (пунктирная линия на схеме). Согласно измерениям (рис. 1, г), минимальный угол соударения будет $14-7=7$ градусов. В случае соударения под углом $\gamma-\alpha$ сварное соединение представляет собой перекристаллизованную структуру титана шириной до 1000 мкм. Границу соединения можно охарактеризовать как нерегулярную волнообразную, имеющую переменную толщину. В волнообразном соединении можно выделить несколько видов структур. В сварном соединении имеются поры округлой формы (рис. 3 – структура 1) окруженные слоем зерен размером 50-100

мкм с пластинчатым характером внутризеренной структуры (рис. 3 – структура 2) и микротвёрдостью 200-250 HV. Структуру 3 обрамляет область металла, не имеющая следов пластического течения из зерен размером от 5 до 50 мкм (рис. 3 – структура 3). Крупные зерна ориентированы в сторону отвода тепла от усадочных раковин. Микротвёрдость металла в этой зоне составляет 140-160 HV. Средняя ширина этой области достигает 180 мкм. Далее, в околошовной зоне вблизи области со структурой 3 (рис. 4), наблюдается структура со следами пластической деформации, фрагментированная полосами адиабатического сдвига, расходящихся от границы рекристаллизованной зоны металла под углом 30-60 градусов к ней (рис. 4 – структура 4). Микротвёрдость металла в этой зоне составляет 180-220 HV.

Морфология структуры 2 (рис.3) свидетельствует о том, что она сформировалась в результате $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения. Наличие пластин в титане, прошедшем $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение, обычно связывают с высокими скоростями охлаждения и степенью дефор-

мации в β -области [2]. Возникновение пор округлой формы связано с расплавлением металла и растворения в нем газа (аргона) из сварочного зазора, который выделяется в усадочную раковину при кристаллизации расплава.

Граница между структурой с пластинчатым характером внутризёренной структуры и зоной рекристаллизованного зерна, по-видимому, является границей фазовой перекристаллизации. Отсутствие следов пластического течения металла, его низкая микротвёрдость и форма зерна структуры 3 (рис. 3 и 4) свидетельствуют о прошедшем в этой зоне процессе рекристаллизации, а уменьшение размера зерна – о предшествующей пластической деформации металла в α -области [2]. Укрупнение зерна свидетельствует о существовании в этой зоне более длительного промежутка времени для прохождения процесса рекристаллизации. Причём рекристаллизация проходит уже после снятия давления и прохождения деформации. По-видимому, в момент образования соединения, свариваемые поверхности под-

вергались деформации в α -области, а затем источник локально выделившегося в области «вихревой зоны» тепла, остывая, привёл к рекристаллизации окружающей её деформированный металл. Отсутствие столь ярко выраженного эффекта при сварке других пар металлов связано с тем, что титан, обладая малой энергией дефектов упаковки, в большей мере склонен к протеканию процесса рекристаллизации, чему способствует также низкая теплопроводность титана. Ширина зоны рекристаллизованного металла значительно колеблется, так как динамику рекристаллизации определяет температура нагрева и степень деформации металла, подвергаемого рекристаллизации.

Факт образования полос адиабатического сдвига в зоне сварного соединения в околошовной зоне при плоском соединении (рис. 2) и в волнообразном соединении (рис. 4) свидетельствует об одинаковом механизме образования соединения в этих местах в результате динамической рекристаллизации и является сопутствующим фактором, вызываемым деформированием макрообъёмов

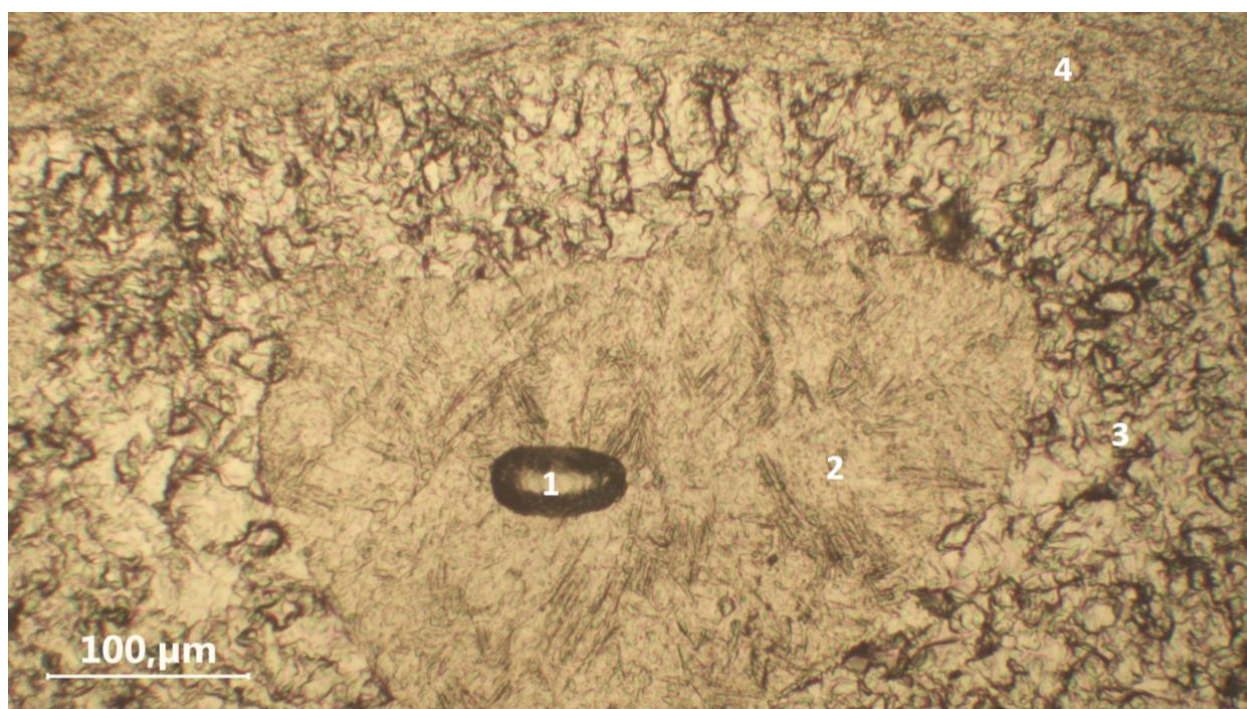


Рис. 3. Области микроструктуры в зоне сварного соединения:
пора (1), двойники в зернах (2), перекристаллизованная структура (3)

поверхностных слоёв свариваемых металлов.

Рассмотрим изменение угла соударения в процессе сварки взрывом в зоне соединения титана с титаном. Для получения соединения в титане плакирующего слоя выполнен скос с углом α . Возьмём два крайних положения: процесс сварки с углом соударения γ набегаёт на скос при спуске (рис. 1, а) и подъёме (рис. 1, б). В первом случае соударение будет происходить под углом $\gamma + \alpha$, для получения качественной сварки необходимо подобрать угол скоса α таким, чтобы угол $\gamma + \alpha$ был меньше максимального критического угла соударения. Во втором случае $\gamma - \alpha$ должен быть больше минимального критического угла соударения, при равенстве угла соударения γ и угла скоса α соединение титана с титаном не будет образовываться. Учитывая изложенное, необходимо при выборе дефекта и подготовки поверхности к повторному плакированию обеспечить угол скоса α на 5° меньше расчётного угла соударения γ для заданного режима сварки. Следует отметить, что не только угол соударения, но и сварочный зазор в этом случае бу-

дет переменным. Следовательно, будут переменными кинематические параметры (угол и скорость соударения), которые определяют качество соединения.

В работе [3] показано, что при сварке взрывом под воздействием ударно сжатого газа (УСГ) происходит очистка и активация свариваемых поверхностей впереди точки контакта до их соударения. При выходе процесса сварки взрывом на спуск (см. рис. 1, б) резко возрастает (в два раза) угол соударения и величина сварочного зазора, в результате снижается давление в ударно сжатом газе впереди точки контакта и скорость его истечения. Следовательно, снижается температура в пограничном слое между УСГ и свариваемыми поверхностями, что привело к отсутствию оплавленных участков и волнообразования (рис. 1, ж и рис. 2).

При выходе процесса сварки взрывом на подъём (см. рис. 1, а) ситуация меняется: скорость истечения УСГ и давление возрастают, что приводит к повышению температуры в пограничном слое между УСГ и свариваемыми поверхностями. В структуре

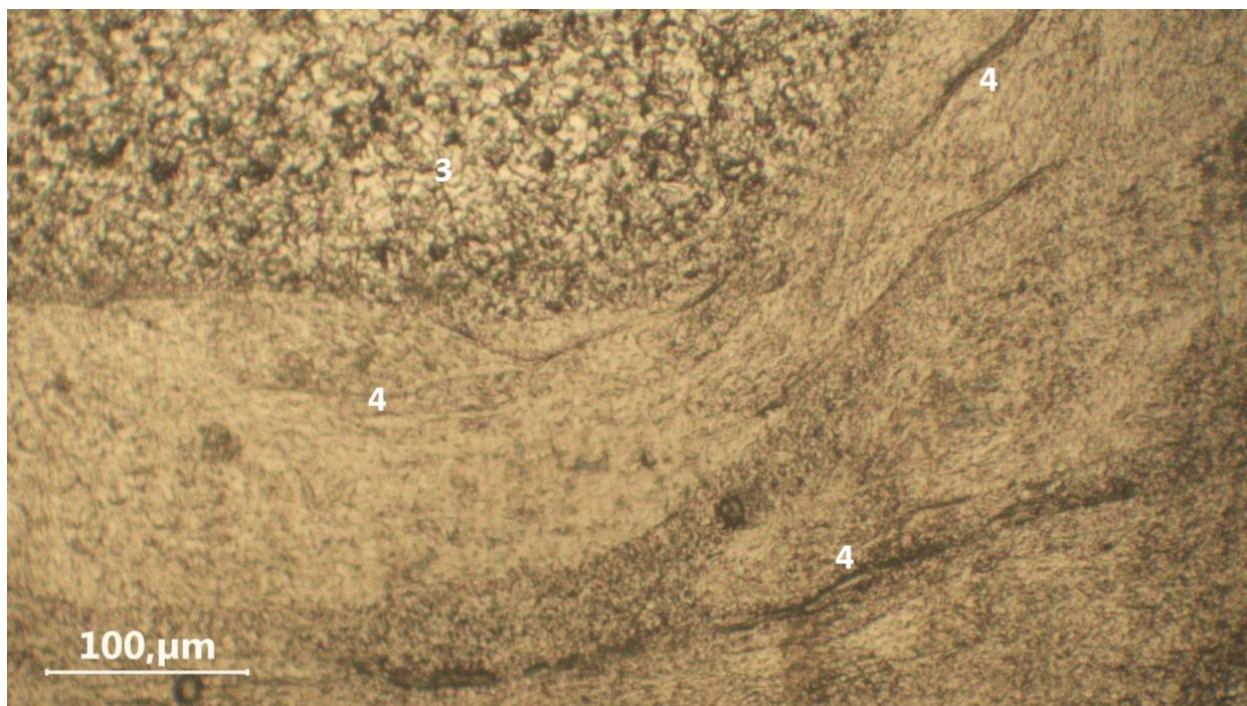


Рис. 4. Области микроструктуры в околошовной зоне: перекристаллизованная структура (3), полосы адиабатического сдвига (4)

наблюдается образование расплавленного металла, а процесс волнообразования становится не стабильным (рис. 1, з и рис. 3).

Выводы

1. Микроструктуры в сварном соединении плакирующего слоя из титана, полученные путём повторного плакирования сваркой взрывом дефектов сплошности соединения слоёв, резко различаются в зависимости от направления угла скоса на кромках дефектной области. Если точка контакта набегаёт на скос при спуске - образуется соединение без волн, при подъёме - образуется не регулярная волна с образованием вихревых зон литых включений, что связано с изменением параметров ударно сжатого газа.

2. Для получения качественного соединения титана с титаном на скосах при повторном плакировании необходимо, чтобы в

процессе сварки взрывом динамический угол соударения на спуске был меньше максимального, а на подъёме больше минимального критического угла соударения.

Библиографический список

1. Исследование возможности ремонта дефектов сплошности биметаллических плит сталь-титан сваркой взрывом / Л. Б. Первухин, Д. В. Ноняк, О. Л. Первухина, И. В. Денисов // Известия ВолГТУ. Серия Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2023. – №11 (282). – С. 23-31.
2. Бердыченко, А. А. Эволюция структуры титана в зоне соединения, полученного сваркой взрывом / А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – № 10 (652). – С. 19-24.
3. Первухина, О. Л. К вопросу об очистке и активации свариваемых поверхностей при сварке взрывом крупногабаритных листов/ О. Л. Первухина // Известия ВолгГТУ. Серия Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2020. – № 11 (246). – С. 58-63.