

ВЫЯВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ СВАРНОГО ШВА

*старший преподаватель З.Ш. Саъдуллаев
Алмалыкский государственного технического института,
кафедра технологических машин и оборудования.*

Аннотация: Кристаллизационное растрескивание сварных швов в большинстве случаев определяется достаточно просто: при металлографическом анализе трещины обычно располагаются вдоль границ кристаллизации. В сплавах с повышенной склонностью к растрескиванию трещины могут идти и по границам субзерен, однако это наблюдается не всегда. В конструкционных и титановых сплавах, где высокотемпературные превращения уничтожают литую структуру, такой признак может отсутствовать, поэтому требуется фрактографическое исследование, обычно с использованием РЭМ при увеличении 500× и выше.

Ключевые слова: поверхность, кристаллизация, структура, металл, шва.

Поверхность разрушения кристаллизационных трещин легко узнаваема по характерной ячеистой или дендритной структуре, возникающей при разрыве тонкой жидкой прослойки между фронтами кристаллизации. Элементы пластичного разрушения встречаются редко. Переход от дендритной поверхности к более плоской, описанный в литературе, обычно указывает на переход к твердотельному растрескиванию, что характерно для аустенитных (ГЦК) металлов шва. Рассмотреть такие микроструктурные особенности возможно только в РЭМ из-за их микронного масштаба.

Материалы, затвердевающие в аустенитной (ГЦК) структуре, более подвержены кристаллизационному растрескиванию, чем ферритные (ОЦК). К ним относятся аустенитные нержавеющие стали, ряд конструкционных сталей и никелевые сплавы. На примере никелевого суперсплава 718 хорошо видно, что сегрегация ниобия вызывает образование эвтектики и фаз NbC или Лавеса, что расширяет интервал кристаллизации и усиливает склонность к трещинообразованию. Следы жидкой плёнки и Nb-содержащих фаз по границам кристаллизации отчётливо видны на микроструктуре.

50 мкм

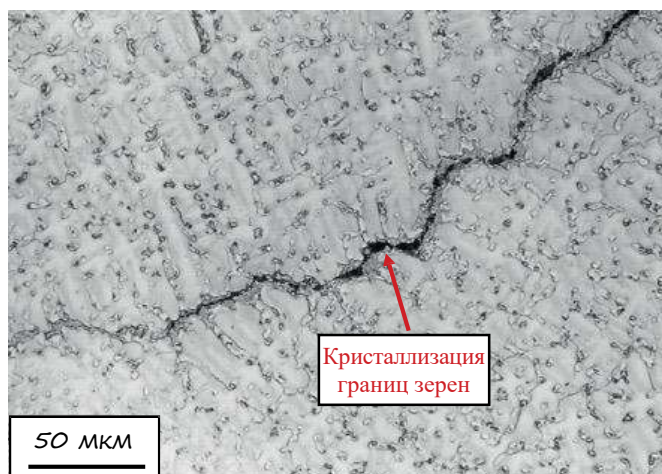


Рисунок 1 Усадочная трещина в никелевом сплаве 718.

Алюминиевые сплавы также склонны к кристаллизационному растрескиванию сварных швов. Все коммерческие сплавы затвердевают как ГЦК α -фаза, а широкий интервал кристаллизации и высокий коэффициент теплового расширения усиливают риск трещинообразования. Большинство таких сплавов относятся к эвтектическим системам и в конце кристаллизации формируют небольшое количество эвтектики, которая может смачивать границы зерен и способствовать трещинам. В отдельных сплавах объем эвтектики регулируется так, чтобы обеспечить частичное «залечивание» дефектов, как, например, в сплаве 2219 (Al–6,5Cu), где около 10% эвтектической жидкости заполняет зоны трещин вдоль ГКЗ. Металлографические и фрактографические исследования показывают влияние количества эвтектической жидкости на форму трещин, что особенно заметно для присадочных металлов Ni–30Cr с разным содержанием ниобия, определяющим объем образующейся эвтектики.

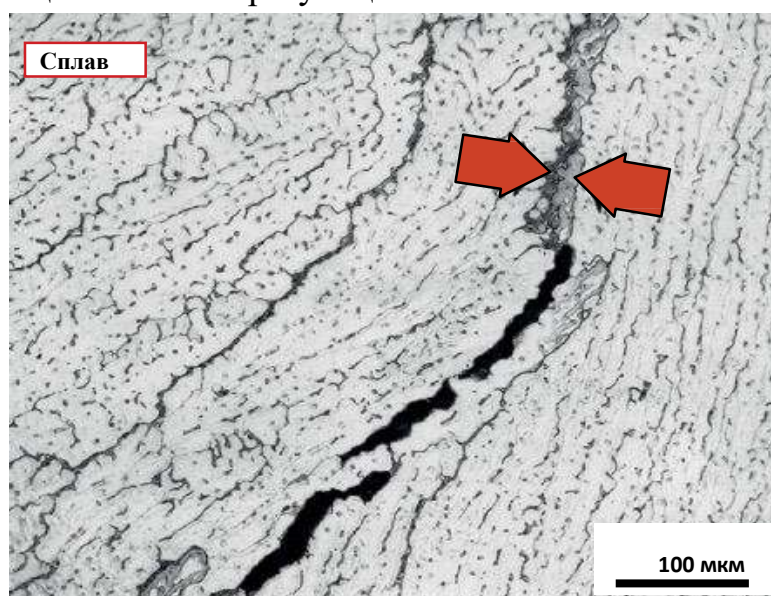


Рисунок 2. Усадочная трещина в алюминиевом сплаве 2219. Стрелки указывают на область залечивания кристаллизационных трещин.

В левой паре изображений (рис. 3. в металле шва содержится менее 5% эвтектической жидкости, поэтому поверхность разрушения имеет чётко выраженную дендритную структуру. В правой паре, где формируется около 10% эвтектической жидкости, обратное заполнение приводит к частичному покрытию поверхности трещины и скрывает дендритный рельеф.

На рис. 4. показан пример растрескивания в никелевом присадочном сплаве 625 (Ni–22Cr–9Mo–3,5Nb). Из-за перераспределения ниобия при затвердевании образуется значительное количество эвтектики γ/NbC или фазы Лавеса, что способствует обратному заполнению вдоль границ кристаллизации. В результате дендритные признаки на поверхности разрушения выражены слабее, поскольку они частично замаскированы эвтектическим покрытием.

Хотя ИТКР сплава 625 составляет около 205 °С и формально указывает на высокую склонность к растрескиванию, на практике этот металл часто демонстрирует хорошую стойкость. Несоответствие связано с методикой определения ИТКР, основанной на высоких поперечных напряжениях, которые усиливают распространение усадочных трещин. При более низких напряжениях эвтектическая жидкость способствует их залечиванию. Тем не менее сплав 625 может растрескиваться при высоком жестком закреплении или неблагоприятной форме валика (высокие D/W или вогнутая геометрия).

Кристаллизационное растрескивание возможно и в материалах с ОЦК-структурой, включая большинство углеродистых и низколегированных сталей, ферритные, мартенситные и дуплексные нержавеющие стали, а также титановые сплавы. В этих сплавах быстрая диффузия при высоких температурах устраняет химическую неоднородность, характерную для ячеисто-дендритной микроструктуры ГЦК. На рисунке 5. показана усадочная трещина в мартенситной стали НТ9: вдоль ГКЗ видны жидкие пленки, а электронно-зондовый анализ выявляет сегрегацию Cr, Mo и примесей P.

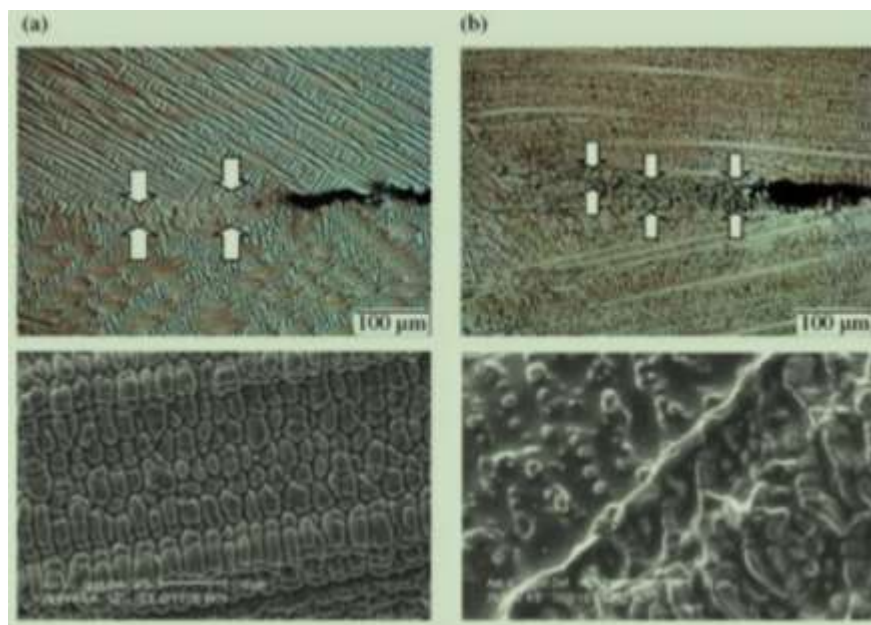


Рисунок 3. Кристаллизационные трещины в металлах сварного шва Ni – 30Cr: (а) низкая фракция эвтектической жидкости и (б) высокая фракция эвтектической жидкости.

В дуплексных сталях кристаллизационное растрескивание также возникает при высоком ограничении. Пример сплава 255 на том же рисунке показывает, что трещина формируется в конце ферритного затвердевания, однако при охлаждении на ГКЗ образуется аустенит, полностью окружающий усадочную трещину.

Кристаллизационное растрескивание сварных швов в титановых сплавах аналогично дуплексным нержавеющей сталям: трещины формируются вдоль бета (ОЦК) ГКЗ в конце кристаллизации, а затем границы превращаются в альфа (ГПУ) при охлаждении. Пример усадочной трещины в α - β -титановом сплаве Ti-6Al-6V-2Sn показан на рис. 7.

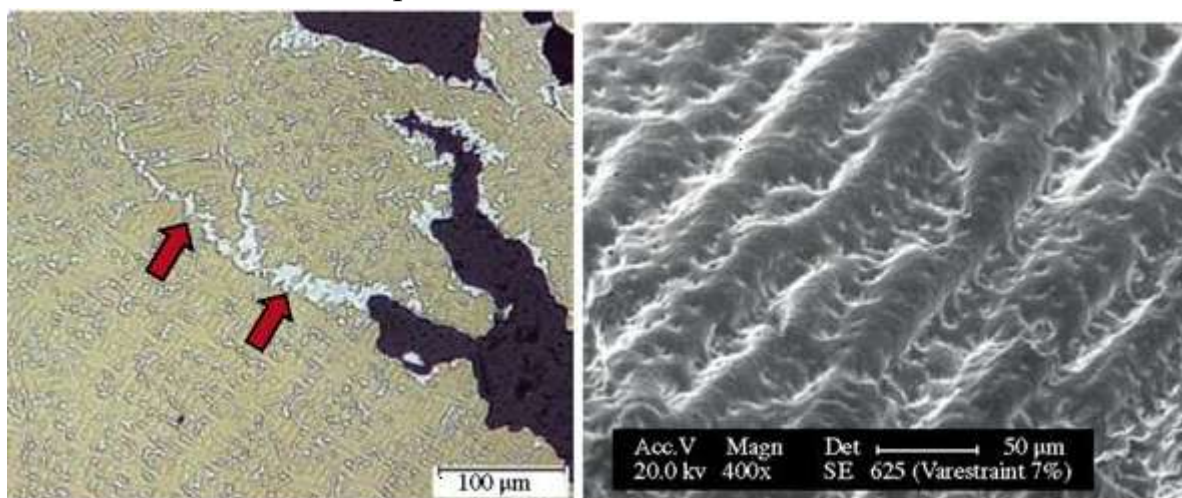
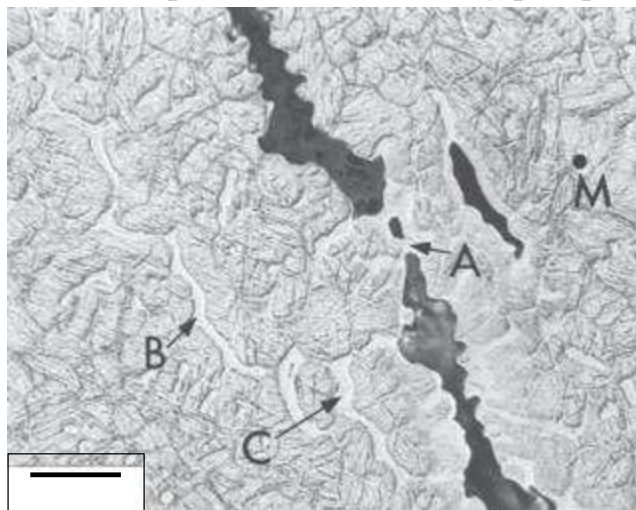


Рисунок 4. Металлографическая и фрактографическая пара, демонстрирующая кристаллизационное растрескивание сварного шва и частичное залечивание трещин (отмечено стрелками) в никелевом сплаве 625.

Предотвращение кристаллизационного растрескивания

Чтобы снизить подверженность трещинообразованию, желательно контролировать механизм кристаллизации. Для сталей ферритная (ОЦК) кристаллизация повышает устойчивость к растрескиванию по сравнению с аустенитной (ГЦК). Если такой контроль невозможен, например, для аустенитных нержавеющей сталей, полезно уменьшить содержание примесей (S, P, возможно В). Другие ОЦК-материалы, включая титан, также обладают хорошей сопротивляемостью к кристаллизационному растрескиванию.



Элемент	A	B	C	M
Cr	18,2	17,0	17,2	12,0
Mo	2,9	2,5	2,4	0,9
Ni	0,5	0,5	0,4	0,4
Mn	0,8	0,7	0,8	0,6
B	0,7	0,6	0,6	0,3
W	0,7	0,7	0,7	0,4
S	0,04	0,08	0,05	0,04
P	0,24	0,27	0,19	0,02

Рисунок 5. Кристаллизационное растрескивание сварного шва в мартенситной нержавеющей стали (сплав НТ9). Состав (в мас.%) вдоль границ

кристаллизации зерен (А, В, С) относительно простого металла сварного шва (М).

В металле сварного шва, где в конце кристаллизации происходит эвтектическая реакция, формируется некоторое количество эвтектической жидкости. Контролировать её объем и распределение пленок желательно, хотя это зависит от состава основного и присадочного металлов. На рис. 5. показано, что в эвтектических системах устойчивость к растрескиванию можно регулировать либо минимизацией жидких пленок, либо увеличением фракции эвтектики для обратного заполнения трещин. В целом, снижение подверженности кристаллизационному растрескиванию достигается сокращением интервала температур кристаллизации, хотя это возможно не всегда.

Ограничение можно регулировать через конструкцию соединения и технологию сварки. Меньшая погонная энергия и сварные швы с вогнутым валиком обычно снижают риск растрескивания. Первичное ограничение связано с усадкой при кристаллизации, но полезно учитывать прочность основного металла. Многие дисперсионно-упрочнённые сплавы, например никелевые суперсплавы, сваривают в отожженном состоянии для уменьшения исходного напряжения. Размещение швов в зонах с низким ограничением или применение сжимающих усилий через крепёж может дополнительно снижать растяжение и подверженность трещинообразованию.

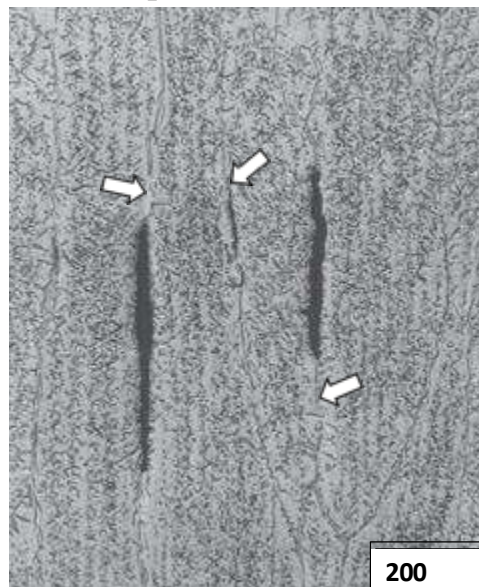


Рисунок 6. Кристаллизационное растрескивание сварного шва в сплаве 255 дуплексной нержавеющей стали. Стрелки указывают на растрескивание до ферритовой кристаллизации границы зерен.

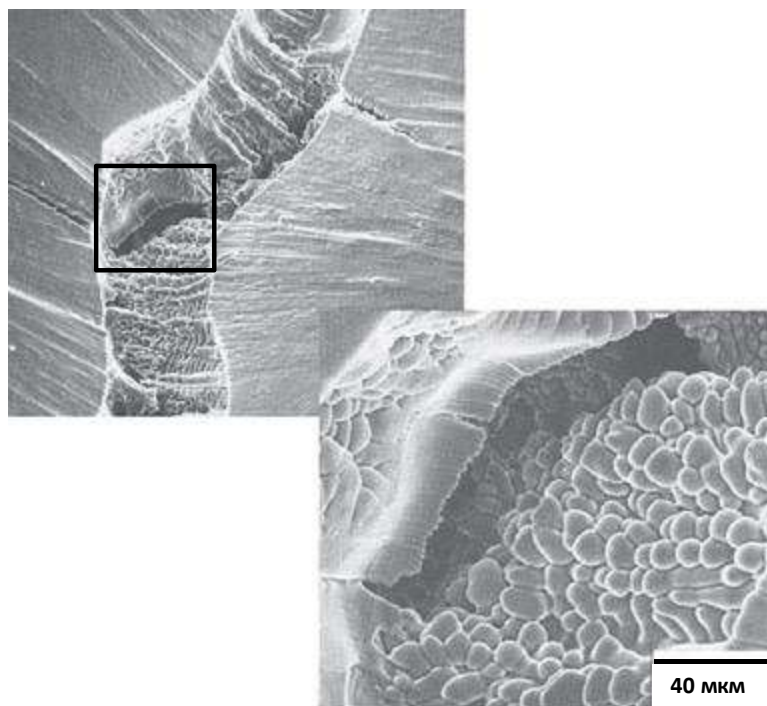


Рисунок 7. Кристаллизационное растрескивание сварного шва в титановом сплаве

Наиболее эффективным способом предотвращения кристаллизационного растрескивания сварного шва является выбор основных и присадочных металлов, устойчивых к трещинообразованию. Если это невозможно, применяют контроль формы валика или ограничения. Для многих материалов, включая никелевые сплавы, малые наплавленные валики обычно снижают риск растрескивания, хотя это увеличивает время сварки и экономические затраты, особенно при толстостенных соединениях.

Литература:

1. Baeslack WA III. Наблюдения кристаллизационного растрескивания в сварных соединениях титановых сплавов. Металлография, 1980;13:277-281.
2. Б.Д. Юсупов, Ф.А. Абдукаримова, С.Д. Мадалиев, О.И. Душабаева (2023) Возможности локализаций производства керамических флюсов в Узбекистане для сварки и наплавки. Volume-11| Issue-10, 380-389, 2023.
3. Ermatov, Z., Dunyashin, N., Yusupov, B., Saidakhmatov, A., & Abdurakhmonov, M. (2022). MODELLING THE CHEMICAL COMPOSITION PROCESS CONCERNING FORMATION OF METALS FROM MANUAL ARC SURFACE ON THE BASIS OF THE ELECTRODE COATING CHARGE COMPONENTS CLASSIFICATION. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, 12. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue12.25>
4. Kholmiraev, N., Turakhodjaev, N., Saidmakhamadov, N., Tadjiev, N., Khasanov, J., Yusupov, B., ... & Juraev, J. (2024, December). Improvement of the Technology

- of Melting of Low Alloy Steel Alloy in an Electric Arc Furnace. In Materials Science Forum (Vol. 1139, pp. 3-9). Trans Tech Publications Ltd.
5. Kholmiraev, N., Saidmakhamadov, N., Khasanov, J., Tadjiev, N., Yusupov, B., Sadikova, N., ... & Nurdinov, Z. (2024, December). Mathematical Modeling of the Effect of TiC Nanopowder Particles on the Wear Resistance Properties of Low-Alloy Steel. In Materials Science Forum (Vol. 1139, pp. 11-19). Trans Tech Publications Ltd.
 6. B.D. Yusupov, A.S. Saidaxmatov, Z.D. Ermatov (2021/10). Mineral resources of the Republic of Uzbekistan for the production of covered electrodes for surfacing a layer of low-alloy steel (TOM 8) IJARSET Vol.
 7. Rustam M Saidov, Rustam Kh Rakhimov, Bekzod D ugli Yusupov, Muhammad KB ugli Kholdorov (2020/6/15). Efficiency of drying and calcining of welding electrodes in furnaces using radiation from nanostructured functional ceramics (NFC) (TOM. 7. pp. 64-70) Computational nanotechnology
 8. Рустам Маннапович Саидов, Рустам Хакимович Рахимов, Бекзод Дилмурод Угли Юсупов, Мухаммад Карим Ботирали Угли Холдоров (2020/1). Новый метод сушки и прокали сварочных электродов с использованием излучателей из функциональной керамики (ст. 44-51). Computational nanotechnology. Издательский дом Юр-БАК.
 9. Рустам Маннапович Саидов, Рустам Хакимович Рахимов, Бекзод Дилмурод Угли Юсупов, Мухаммад Карим Ботирали Угли Холдоров (2020/2) Эффективность сушки и прокали сварочных электродов в печах с использованием излучения наноструктурированной функциональной керамики (НФК) (ст. 64-70). Computational nanotechnology. Издательский дом Юр-БАК.
 10. B.D. Yusupov, Z.Sh. Sa'Dullaev (2025. 6-1 (133)). KAM LEGIRLANGAN VA KAM UGLERODLI PO'LATLAR YEYILGAN YUZALARINI ERITIB QOPLASHDA ELEKTROD QOPLAMASI TARKIBINI TAKOMILLASHTIRISH MASALALARI (ст.1661-1653). Экономика и социум. ООО «Институт управления и социально-экономического развития».
 11. B.D. Yusupov, N.S. Dunyashin, (2024, 12-1 (127)). CHARACTERISTICS OF GAS-GENERATING COMPONENTS OF ELECTRODE COATINGS AND INFLUENCE WELDABILITY (ст. 557-561). Экономика и социум. ООО «Институт управления и социально-экономического развития».
 12. B.D. Yusupov (2024, 12-1 (127)). INVESTIGATION OF DEPOSITED METAL WELDING-SURFACING CHARACTERISTICS BY USING OF SPECIAL COATED ELECTRODES (ст. 1254-1258). Экономика и социум. ООО «Институт управления и социально-экономического развития».

13. B.D. Yusupov, L.M. Raufov (2024, 12-1 (127)). EXPERIMENTAL RESULTS OF WEARING REASONS OF THE DOD-41 500 EXHAUSTER AND INCREASING WEAR RESISTANCE (ст. 552-556). Экономика и социум. ООО «Институт управления и социально-экономического развития».
14. Nozimjon Kholmirzaev, Jamshidbek Khasanov, Baxodirjon Abdullayev, Shokhista Saidkhodjaeva, Abdusalol Bektemirov, Nargiza Sadikova, Bekzod Yusupov, Ibrokhim Sodik Nosirkhujaev, Zokirjon Nurdinov (2024, 525). Improving the technology of obtaining highquality castings from steel in sand-clay molds (ст. 03012). E3S Web of Conferences, EDP Sciences.
15. Rustam M Saidov, Rustam Kh Rakhimov, BEKZOD DU Yusupov, MUHAMMAD KBU Kholdorov (2020/3/15). A new method for drying and calcining welding electrodes using emitters made of functional ceramic (TOM 7, ст. 44-51). Computational nanotechnology.
16. T.U. Umarov, U.T. Mardonov, O.A. Khasanov, Sh. O. Ozodova, B.D. Yusupov (2020/4). Research of the variation of firmness of pointed drills by method of simulation modeling of process of wear (TOM 24, ст. 1885-1902). International Journal of Psychosocial Rehabilitation.
17. Б.Д. Юсупов, Ф.А. Абдукаримова, С.Д. Мадалиев, О.И. Душабаева, (2023/10/22). Возможности локализаций производства керамических флюсов в Узбекистане для сварки и наплавки (Volume-11| Issue-10, ст. 380-389). Возможности локализаций производства керамических флюсов в Узбекистане для сварки и наплавки. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8432702>