



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-90-97>
УДК 543.42

Поступила 01.11.2024
Received 01.11.2024

АРТЕФАКТЫ В МЕТАЛЛОГРАФИИ: МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ПРОБОПОДГОТОВКЕ. СООБЩЕНИЕ 2. АРТЕФАКТЫ, ВНОСИМЫЕ ШЛИФОВКОЙ И ПОЛИРОВКОЙ

А. Г. АНИСОВИЧ, Институт прикладной физики НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 16. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru

Продемонстрирован вид шлифов сплавов черных и цветных металлов при неполном удалении дефектного слоя отрезки. Показаны дефекты за счет недостаточной шлифовки и полировки на различных этапах производства шлифа, а также влияние завала кромки шлифа на результаты металлографического анализа.

Ключевые слова. Пробоподготовка, шлифовка, полировка, кометные хвосты, резкость изображения.

Для цитирования. Анисович, А. Г. Артефакты в металлографии: механические повреждения при пробоподготовке. Сообщение 2. Артефакты, вносимые шлифовкой и полировкой / А. Г. Анисович // *Литье и металлургия*. 2025. № 1. С. 90–97. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-90-97>.

ARTIFACTS IN METALLOGRAPHY: MECHANICAL DAMAGE DURING SAMPLE PREPARATION. PART 2. ARTIFACTS INTRODUCED BY GRINDING AND POLISHING

A. G. ANISOVICH, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 16, Akademicheskaya str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru

This study demonstrates the appearance of ground surfaces of ferrous and non-ferrous metal alloys when the defective layer from sectioning is incompletely removed. The defects resulting from insufficient grinding and polishing at various stages of sample preparation, as well as the impact of “edge rounding” on the accuracy of metallographic analysis, are discussed.

Keywords. Sample preparation, grinding, polishing, comet tails, image sharpness.

For citation. Anisovich A. G. Artifacts in metallography: mechanical damage during sample preparation. Part 2. Artifacts introduced by grinding and polishing. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 1, pp. 90–97. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-90-97>.

Механические повреждения – наиболее частые артефакты, сопровождающие процесс пробоподготовки. Они могут быть внесены как на операции отрезки, так и при последующих зачистке, шлифовке и полировке шлифа, поскольку все операции пробоподготовки так или иначе являются механической обработкой. Задача каждого ее этапа – формирование поверхности определенного качества и устранение следов предыдущей обработки. Если она не выполнена, на шлифе могут проявиться определенные артефакты.

В данной статье рассматриваются артефакты металлографических образцов, внесенные шлифовкой и полировкой.

Материалы и методики

В исследовании использованы стали различных марок, сплавы меди и алюминия. Металлографический анализ проведен на инвертированном металлографическом микроскопе МИ-1 с увеличением от 100 до 1000 крат.

Результаты и их обсуждение

Артефакты шлифовки и полировки, которые появляются в процессе зачистки поверхности образцов, можно разделить по масштабу, а также по степени влияния на результаты металлографического анализа. На рис. 1 показаны следы грубой шлифовки на крупной шкурке при попытке изготовления шлифа из

металлической фольги с неровной поверхностью. Видны трещины, следы натертостей, а также дырок, образовавшихся на выступающих участках материала.

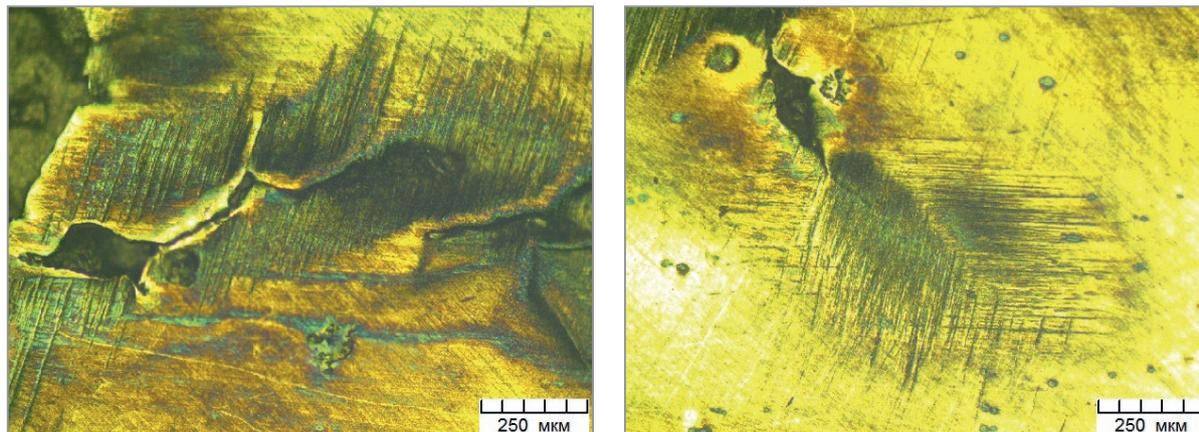


Рис. 1. Поверхность стальной фольги со следами шлифовки шкуркой

Задача шлифовки заключается в дальнейшем формировании плоскости образца, а также удалении слоя, содержащего дефекты, внесенные отрезкой. Обычно он составляет 0,1–0,3 мм, иногда несколько больше. Если же этот слой не удален, то на готовом шлифе наблюдаются следы хода резца (рис. 2). Поверхность образца меди сформирована на токарном станке, затем проведены шлифовка с неполным удалением слоя со следами токарной обработки, заключительная полировка и металлографическое травление. Как видно из рис. 2, *а*, *б*, неудаленные следы хода резца не дают возможности видеть реальную структуру. На рис. 2, *в* приведена структура того же образца, приготовленного правильно.

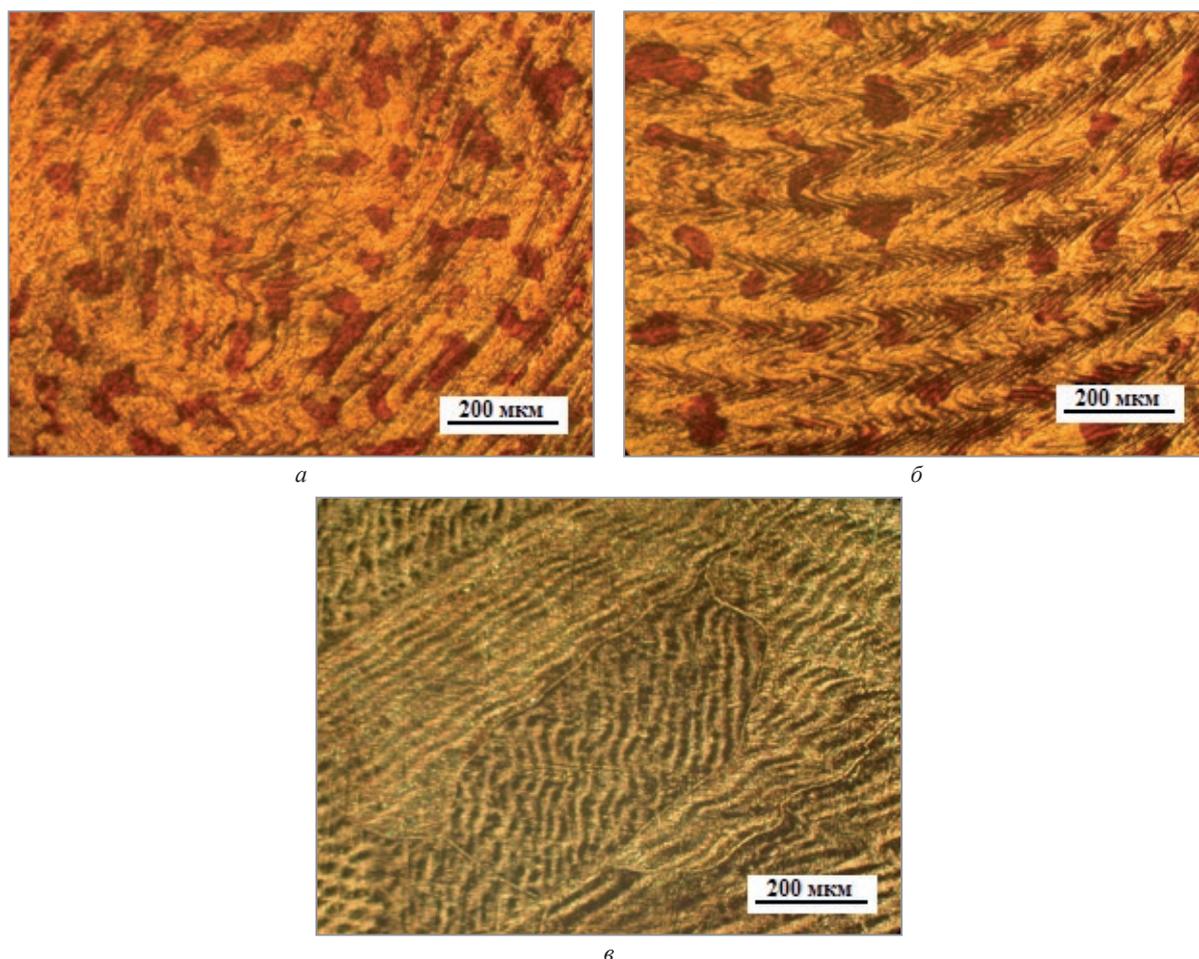


Рис. 2. Микроструктура образца меди, полученного поперечно-клиновой прокаткой, после неполного удаления следов отрезки на станке: *а*, *б* – центр и край заготовки соответственно; *в* – правильно приготовленный шлиф

Изображения поверхности со следами тонкой шлифовки на пасте представлены на рис. 3 в светлом и темном поле. При таких дефектах структура не проявляется, можно только оценить глубину упрочненного слоя.

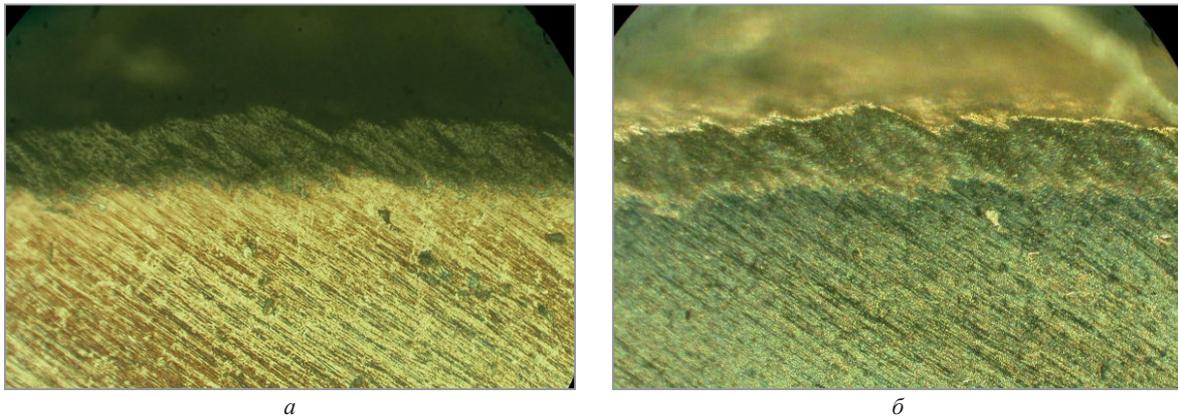


Рис. 3. Изображение поверхности образца с неполным удалением следов полировки на пасте: *а* – светлое поле; *б* – темное поле

На рис. 4, *а* показаны царапины на образце латуни после недостаточной полировки на сукне и последующего металлографического травления. Пример удовлетворительной полировки шлифа латуни приведен на рис. 4, *б*. Структура после травления различается хорошо, четко просматриваются границы зерен и двойники. Зерна с различной ориентацией имеют различные оттенки цвета.

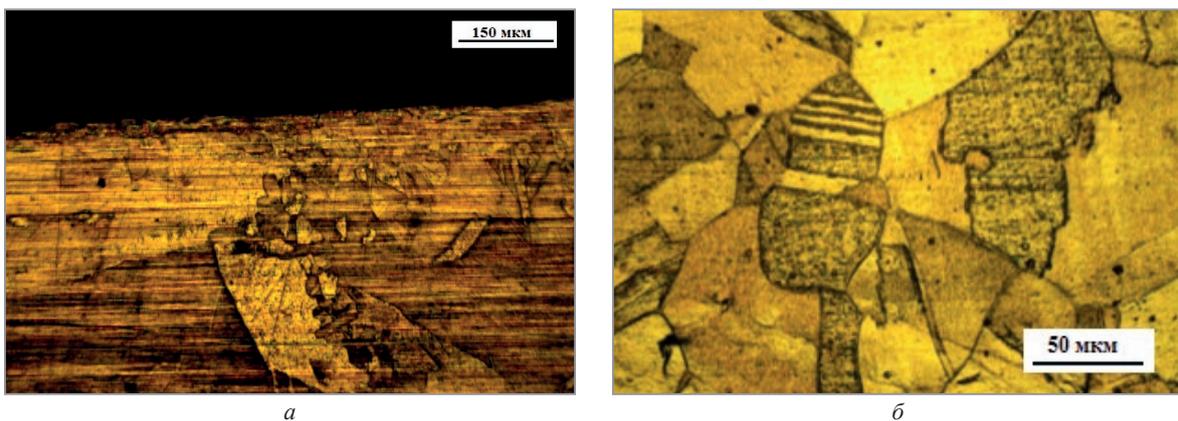


Рис. 4. Шлиф латуни: *а* – поверхность с царапинами; *б* – качественный шлиф

На рис. 5 показан вид поверхности шлифа цементованной стали 20ХН3А после недостаточной полировки на сукне. При увеличении 1500 структура цементованного слоя видна достаточно хорошо (рис. 5, *а*), царапины не мешают сделать выводы о характере структуры. Поскольку сердцевина образца не упрочнена, она мягче, и царапины проявляются даже при максимальном увеличении, что затрудняет анализ (рис. 5, *б*).

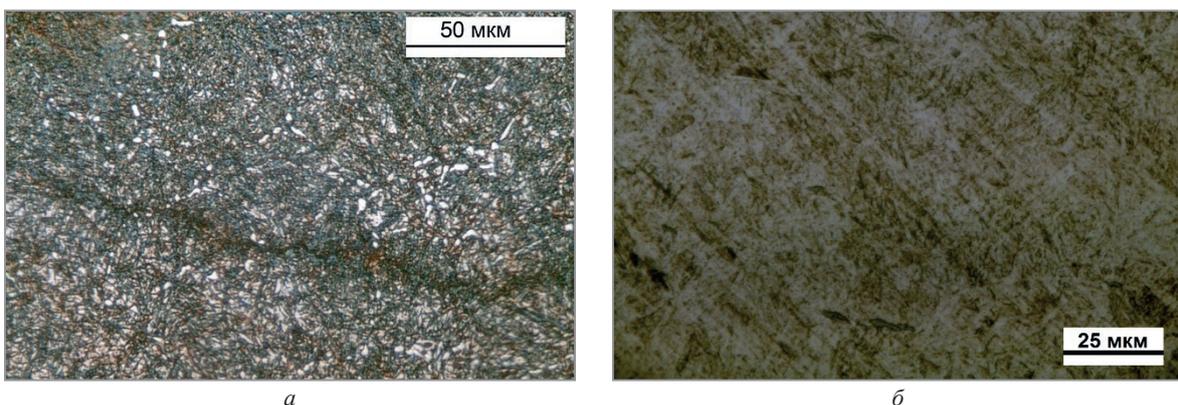


Рис. 5. Сталь 20ХН3А после цементации: *а* – макроструктура образца; *б* – цементованный слой

Присутствие царапин создает трудности при компьютерной обработке изображений [1]. Как правило, соответствующие программы построены на сравнительном анализе яркости различных участков структуры. Поэтому царапины воспринимаются как отдельные объекты или границы зерен и фаз. На рис. 6 приведены фотографии кислородной меди после деформации. На структуре (рис. 6, *а*) присутствуют выделения куприта по границам дендритов, линии сдвига, а также царапины от некачественной полировки. Линии сдвига заканчиваются в пределах зерна или дендрита, царапины же пересекают границы зерен и фаз и распространяются зачастую на все поле зрения. На рис. 6, *б* показан качественный шлиф, на котором присутствуют куприт и линии сдвига. В данном случае видно, что линии сдвига начинаются и заканчиваются в одном зерне, не пересекая его границы. Ориентация линий сдвига различна для разных дендритов; на рассматриваемом участке можно выделить две системы скольжения.

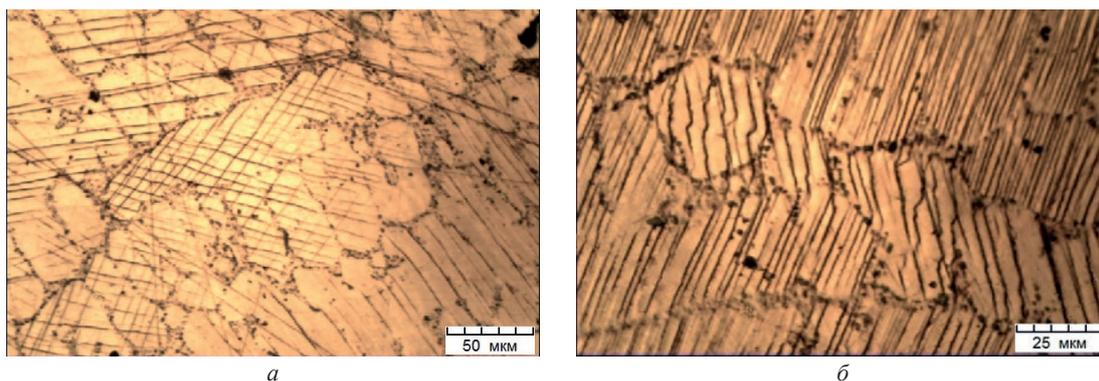


Рис. 6. Кислородная медь: *а* – шлиф с царапинами; *б* – качественный шлиф

К общеизвестным дефектам шлифовки обычно относят так называемый «кометный хвост» [2]. Как правило, этот эффект создается частичками образца, которые перекатываются по поверхности в процессе шлифовки. Кометные хвосты иногда образуются при отсутствии вращения при приготовлении образцов, когда абразив распределяется неравномерно. Такие дефекты могут быть приняты за включения упрочняющих или избыточных фаз. Эффект кометного хвоста связан с плохим прижимом образца к поверхности шкурки и может быть устранен последующей шлифовкой на более мелкой шкурке. На рис. 7 дан пример кометных хвостов для различных материалов.

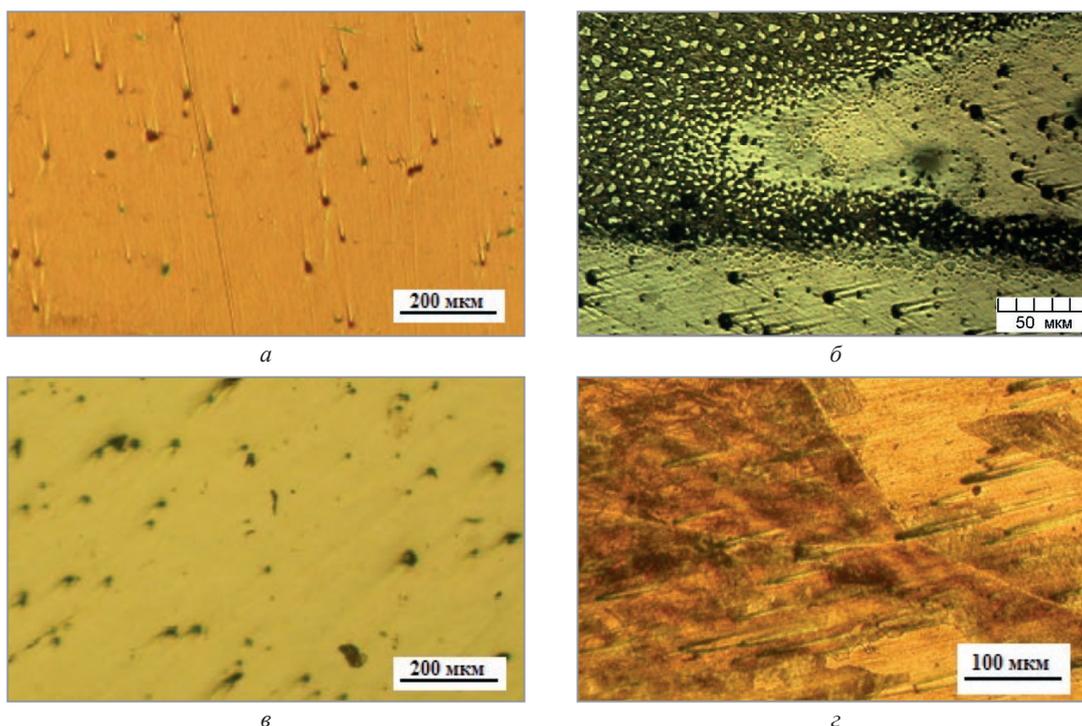


Рис. 7. Кометные хвосты на поверхности шлифов различных материалов: *а* – нешлифованная медь; *б* – полимерный композиционный материал; *в* – грязь на кометных хвостах; *г* – протравленная медь

На рис. 8 приведена трещина, распространившаяся в образце стали из участка некачественной сварки. Направление полировки, при которой сформировались кометные хвосты, совпадает с направлением трещины. При отсутствии травления эти дефекты легко узнаваемы (рис. 8, *а*). Устье трещины перекрывается треками, созданными абразивом. После травления мелкие частицы абразива частично декорируются, хвосты от крупных включений рельефно подтравливаются (рис. 8, *б*) и затем могут быть приняты за особенности структуры, например, при небольшом увеличении. На рис. 8, *в* представлены кометные хвосты, расположенные под углом к трещине. Дифференциально-интерференционный контраст помогает визуализировать объемные эффекты; дорожки, оставленные частицами абразива, имеют желтый цвет.

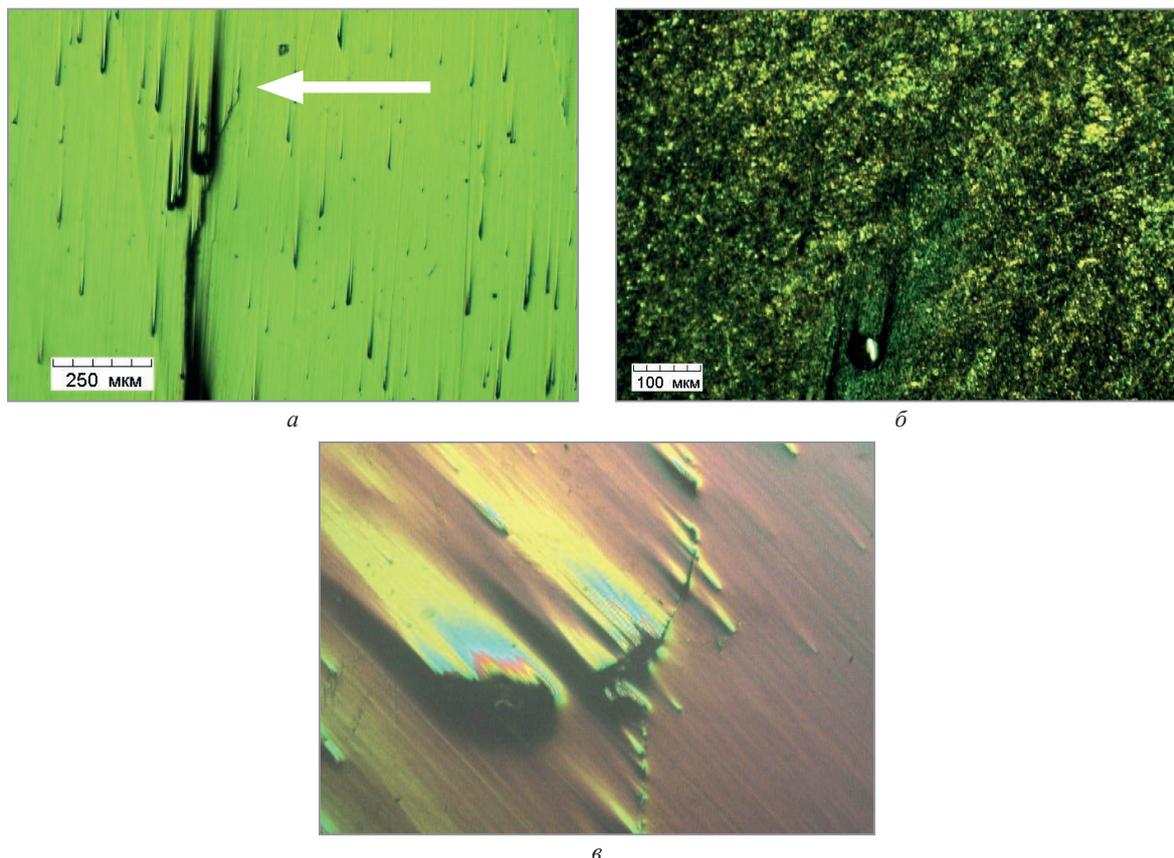


Рис. 8. Кометные хвосты вокруг развивающейся трещины: *а* – нетравленный шлиф (трещина указана стрелкой), $\times 100$; *б* – тот же участок после травления; *в* – нетравленный шлиф, дифференциально-интерференционный контраст [1]

Довольно частым явлением бывает неоднородная, неодинаковая степень обработки различных участков шлифа, например, завалы краев, представляющие собой скругления кромок. Макроснимок образца с завалом представлен на рис. 9, *а*. Стрелками отмечены зоны завала. Следует отметить, что завал края имеет место практически на всех образцах, приготавливаемых без оправки, струбцины, заливки сплавом Вуда или различными пластмассами. В том случае, когда преследуют цель увидеть структуру в центре образца, завал края существенного значения не имеет. Структура центральной части образца представлена на рис. 9, *б* и имеет вид, типичный для силуминов.

В заваленной части образца структура не пригодна для анализа. Сильно сказываются эффекты неравномерной выполировки различных фаз. Более мягкая алюминиевая матрица выполировывается быстрее. В светлом поле (рис. 9, *в*) выполировка проявляется в формировании темных зон вокруг кристаллов кремния. В дифференциально-интерференционном контрасте наблюдаются характерные переходы цветов за счет неровности поверхности в этих зонах (рис. 9, *г*).

Завал кромки может приводить к неточностям при оценке толщины покрытий. Например, при оценке толщины цинкового покрытия толщиной 12 мкм за счет завала края было потеряно 2 мкм, и экспертная оценка определила толщину слоя как 10 мкм (рис. 10 *а, б*) [3]. Для определения слоя шлиф залили в пластмассу; завал образовался, вероятно, за счет недостаточной квалификации персонала. При сохранении на поверхности изделия защитной пленки из пластика (синяя) толщина цинкового слоя определяется без ошибки (рис. 10, *в*).

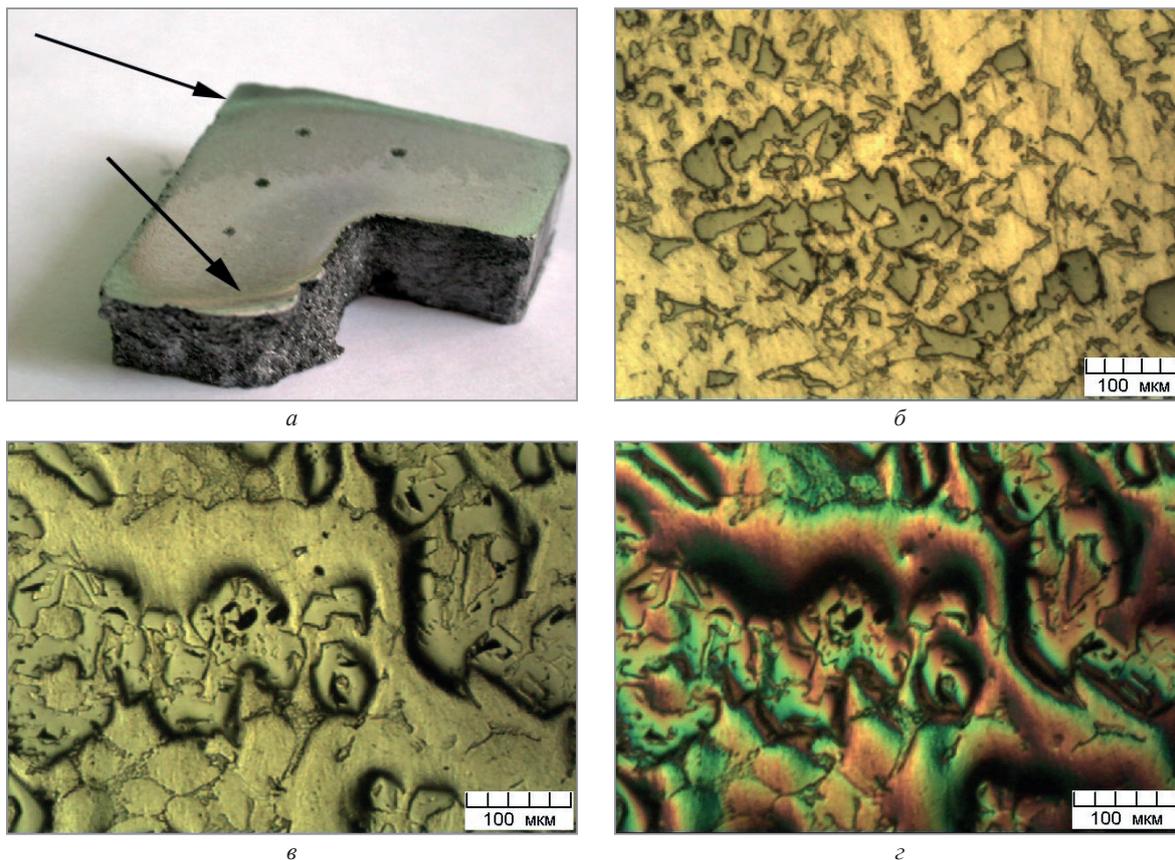


Рис. 9. Образец с завалом (а) и структура в центре образца (б) и на краю заваленной зоны (в, г); б, в – светлое поле; г – дифференциально-интерференционный контраст

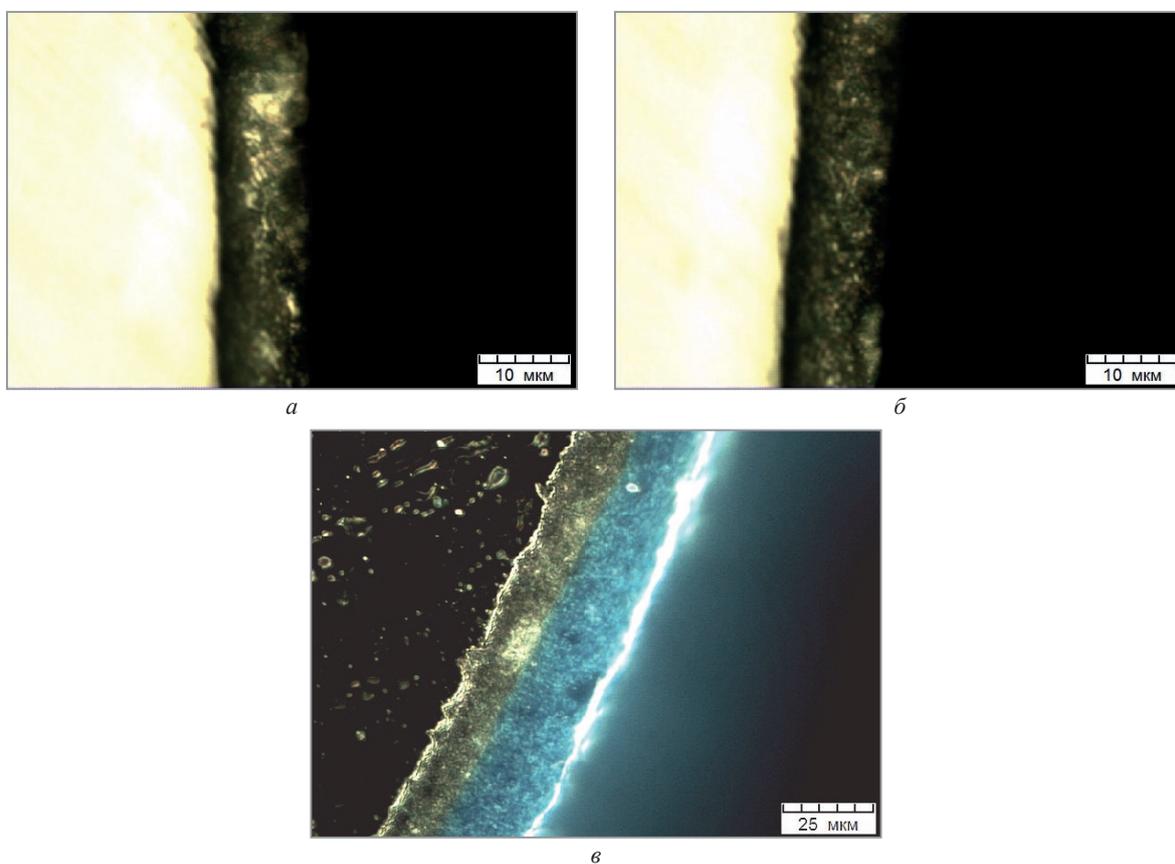


Рис. 10. Оцинкованный слой на поверхности стали: а – незначительный завал; б – завал практически отсутствует; в – заливка в сплав Вуда, пластмассовая пленка не удалена, темное поле

При высоком качестве подготовки шлифа детали изображения четко видны при различных увеличениях. На рис. 11 представлена структура поперечного шлифа образца стали 45, обработанного компрессионной плазмой азота. В светлом поле хорошо различимы все детали структуры, причем в резкости находится все поле зрения, даже при увеличении 2000 крат [4]. Завал в этом случае минимален.

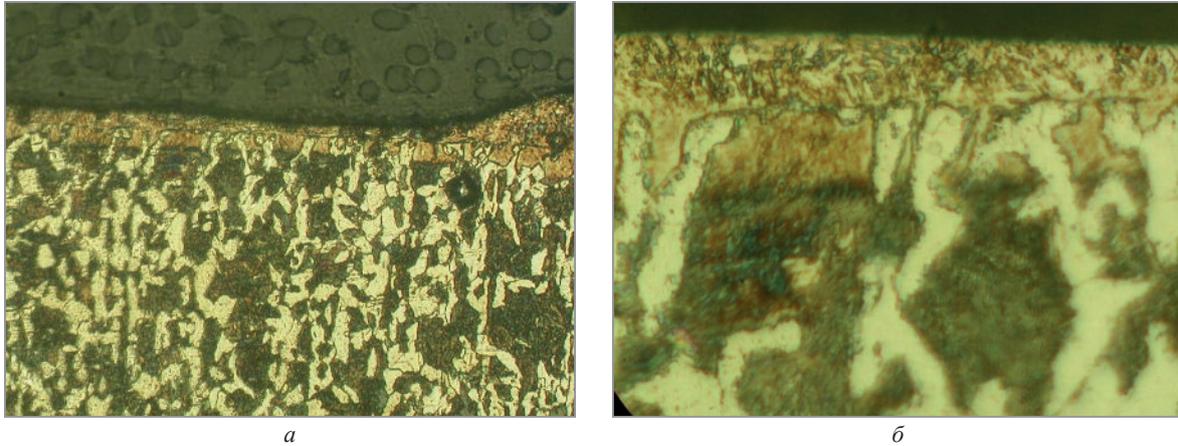


Рис. 11. Пример хорошо подготовленного и протравленного шлифа при различных увеличениях:
а, б – светлое поле; в – темное поле [4]

Нечеткость изображения можно наблюдать и на удалении от края образца, причем эффект может не иметь ничего общего с ошибкой наводки на резкость. На рис. 12 представлена структура стали ШХ15, где наблюдаются резкие (1) и нерезкие (2) участки. Резкость зоны 2 не удалось повысить за счет изменения фокусировки. Эффект связан с неоднородным напряженным состоянием образца [5].

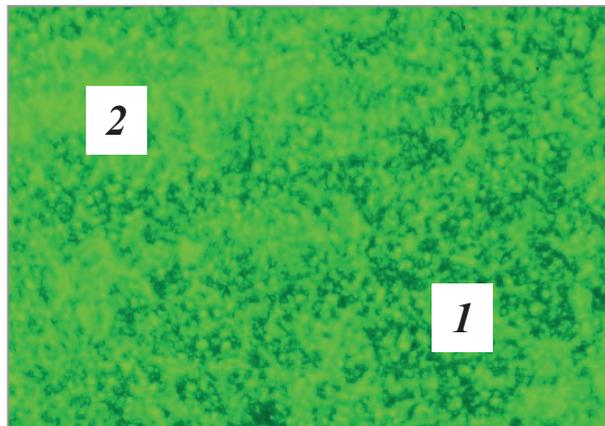


Рис. 12. Структура подшипниковой стали с участками нечеткой структуры

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анисович, А.Г.** Практика металлографического исследования материалов / А.Г. Анисович, И.Н. Румянцева. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 221 с.
2. Приборы и методы физического металловедения / под ред. Ф Вайнберга; пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – Т. 1.
3. **Анисович, А.Г.** Особенности металлографического препарирования для анализа тонких слоев и покрытий / А.Г. Анисович // Литье и металлургия. – 2020. – № 2. – С. 59–62.
4. Изменение микроструктуры и механических свойств железа в результате воздействия компрессионного плазменного потока / В.В. Углов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2004. – № 4. – С. 37–42.
5. **Anisovich, A.G.** Microstructural effects on the surface of materials in magnetic fields / A.G. Anisovich // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2019. – Vol. 55, no. 2. – P. 157–161.

REFERENCES

1. **Anisovich A.G., Rumyantseva I.N.** *Praktika metallograficheskogo issledovaniya materialov* [Practice of metallographic research of materials]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2013, 221 p.
2. **Weinberg F. (ed.)** *Pribory i metody fizicheskogo metallovedeniya* [Devices and methods of physical metallurgy]. Moscow, Mir Publ., 1973, vol. 1.

3. **Anisovich A.G.** Osobennosti metallograficheskogo preparirovaniya dlya analiza tonkih sloev i pokrytij [Particularities of metallographic preparation for the analysis of thin layers and coatings]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 2, pp. 59–62.

4. **Uglov V.V. [et al.]** Izmenenie mikrostruktury i mekhanicheskikh svoystv zheleza v rezul'tate vozdeystviya kompressionnogo plazmennogo potoka [Change in the microstructure and mechanical properties of iron as a result of exposure to a compression plasma flow]. *Fizika i himiya obrabotki materialov = Physics and chemistry of materials processing*, 2004, no. 4, pp. 37–42.

5. **Anisovich A.G.** Microstructural effects on the surface of materials in magnetic fields. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 157–161.