СХОДСТВО И РАЗЛИЧИЕ СПЕЦИФИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ AISI 316L В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ И УДАРНОЙ НАГРУЗКИ

SIMILARITIES AND DIFFERENCES IN THE SPECIFICITY OF DEFORMATION OF AISI 316L STEEL UNDER FRICTION AND IMPACT LOADING CONDITIONS

CZU: 538.9:538.951 **https://doi.org/10.59295/spd2024n.115**

Дарья ГРАБКО,
ORCID: 0000-0002-4319-367X
e-mail: daria.grabco@ifa.usm.md
Институт Прикладной Физики, Государственный Университет Молдовы
Константин ПЫРЦАК,
ORCID: 0000-0002-7775-237X
e-mail: constantin.pirtac@fiz.utm.md
Институт Прикладной Физики, Государственный Университет Молдовы;
Технический Университет Молдовы
Андриан ПРИСАКАРУ,
ORCID: 0000-0001-7809-0868
e-mail: andrian.prisacaru@ifa.usm.md
Институт Прикладной Физики, Государственный Университет Молдовы;
Технический Университет Молдовы
Дарья ТОПАЛ,
ORCID: 0000-0003-1960-4747
e-mail: daria.topal@ifa.usm.md
Институт Прикладной Физики, Государственный Университет Молдовы
Марко ВИЛОТИЧ,
ORCID: 0000-0002-1945-0007
e-mail: marko.vilotic@gmail.com
Университет Новый Сад, Новый Сад, Сербия
Драгиша ВИЛОТИЧ,
ORCID: 0000-0002-2430-5314
e-mail: dragisa.vilotic@gmail.com
Университет Новый Сад, Новый Сад, Сербия
Ольга ШИКИМАКА,
ORCID: 0000-0003-4055-3761
e-mail: olga.shikimaka@ifa.usm.md
Институт Прикладной Физики, Государственный Университет Молдовы

Eng.

“Similarities and differences in the specifics of deformation of AISI 316L steel under friction and impact load conditions.” (Authors: Daria Grabco, Constantin Pyrtsac, Andrian Prisacaru, Daria Topal, Marko Vilotic, Dragisa Vilotic, Olga Shikimaka)

Ru.

“Сходство и различие специфики деформирования стали AISI 316L в условиях трения и ударной нагрузки”. (Авторы: Дарья Грабко, Константин Пырцак, Андриан Присакару, Дарья Топал, Марко Вилотич, Драгиша ВИЛОТИЧ, Ольга ШИКИМАКА)

Summary. *The paper studies the formation of a hardened nano-microstructured (NMS) surface layer on AISI 316L stainless steel using two methods: light friction and light impact loading. The studies have shown that the forming NMS layer has both common and different features that can affect the properties of the modified material in different ways. The common features of the NMS layer under friction and impact loading include the fragmentation of the grain structure, the appearance of slip bands inside the grains, an increase in the strength and plasticity parameters. On the other hand, some differences are noted: a different degree of hardening in the NMS layer compared to the original undeformed surface, different sizes of the NMS layer, etc. Based on the obtained results, it can be assumed that the friction method can be used to obtain a slightly strengthened NMS layer with a thickness of about 500 μm. The impact load method is preferable for obtaining a more strengthened NMS layer of thickness ≈15-20 μm.*

Ключевые слова*: friction, impact loading, layer fragmentation, stainless steel*.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем материаловедения является создание новых материалов или модификация свойств уже существующих в соответствии с потребностями современной инженерии и производства. Большое место в настоящее время занимают вопросы получения наноструктурированных (нс-) материалов [1,2]. Для получения нс-материалов разработаны различные методы. с применением интенсивной пластической деформации (ИПД), такие как равноканальное угловое прессование (РКУП), деформация кручением, также методы химического осаждения и др. Важное место занимают методы модификации поверхности материала за счет образования наноструктурированного поверхностного слоя, т.е. посредством поверхностной нанокристаллизации (ПНК) [3]. Данные методы используют различные способы измельчения поверхностного слоя исходной микрозеренной структуры объемного материала до нанозеренной структуры. Основными из них являются метод поверхностной механической обработки истиранием (ПМОИ) [2], метод ультразвуковой дробеструйной обработки (УДСО) [4] и др. Однако большинство указанных методов являются достаточно сложными и трудными в исполнении.

Нашими исследованиями [5,6] было показано, что и более простые способы деформирования, а именно трение и концентрированная нагрузка, позволяют создавать наномикроструктурированный (НМС) слой в поверхностном слое нержа-

веющей стали AISI 316L и приводят к повышению параметров прочности и пластичности. Как известно, механические параметры характеризуют способность материала противостоять деформации и разрушению, тем самым улучшение механических параметров материалов и изделий из них позволяет увеличивать срок их практического применения.

Учитывая сказанное, целью данной работы является более детальное изучение специфики формирования НМС слоя и сравнение какой из способов, легкое трение или легкая ударная нагрузка, может быть более подходящим для создания НМС слоя в нержавеющей аустенитной стали AISI 316L с целью ее инженерного и производственного применения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве материала для проведения испытаний была выбрана аустенитная нержавеющая сталь AISI 316L, имеющая следующий химический состав, %: (**C** 0.019; **Mn** 1.74; **P** 0.017; **S** 0.001; **Si** 0.5;**Cr** 17.38; **Ni** 14.24; **Mo** 2.85; **N** 0.062; **Cu** 0.1; **Fe** 63.09). Образцы представляли собой шайбы размером (15x15x5) мм. Были проведены исследования специфики деформации стали для двух способов обработки: 1 - легкое сухое трение «металл/металл», а именно, сталь AISI 316L/сталь Ст3сп, с различной длительностью процесса ($t_{тр.}$=1; 5; 10 и 15 часов) и 2 – легкая ударная нагрузка. Нормальное давление на сталь AISI 316L при трении составляло P_{norm}≈400 мН. Исследование модификации микроструктуры в результате трения и определение механических параметров проводились на поперечных сечениях образцов.

При обработке образцов ударами изучение микроструктуры велось на поверхности, подвергнутой ударам. Деформация ударами проводилась на установке, позволяющей наносить многократные легкие ударные воздействия. Множественные локальные удары на образец AISI 316L производились благодаря резкому воздействию штока поршня, с наклеенным на его основание шлифовальным кругом Р2000, вырезанным по форме поршня. Сила удара поршня равнялась $P \approx 5{,}0$ Н, длительность удара $t_{уд.} \approx 1$ s. Чтобы проследить эволюцию изменения микроструктуры образцов и толщины деформированного поверхностного слоя было проведено различное количество ударов: N=100, 200, 400, 600, 800, 1000 и 1200. Для выявления зеренной микроструктуры образцов проводили селективное химическое травление в растворе состава: 2,5 мл HCl+1 мл глицерина+0,5 мл HNO_3. Время травления: 0,5 – 20 мин. Микротвердость была оценена на нанотестере PMT3-NI-2 и микротвердомере ПМТ-3 известными методами, по методу Берковича и по методу Виккерса [7,8]. Изучение микроструктуры образцов проводилось методом оптической микроскопии (ОМ) на приборах Amplival и XJL-101 с цифровым мониторингом. Исследование микроструктуры деформированных поверхностей проводилось непосредственно после нанесения ударов и после полировок на приборе МоРао 160Е. Скорость полировки была оценена по длительности сполировы-

вания отпечатков Виккерса (P= 2,0 Н), которая составила 10 мин. С учетом того, что глубина отпечатков Виккерса $h= d/7$, где d – диагональ отпечатка, была определена скорость полировки (v). Она составила v = 0,43 мкм/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Специфика формирования НМС слоя при легком трении стали AISI 316L. На рис. 1 показана эволюция изменения микроструктуры стали по мере удаления от поверхности трения для длительности процесса t= 1 час. Можно видеть, что вблизи поверхности трения (Рис. 1а) ($l_1 \approx$ 10 мкм) наблюдается мелко раздробленная структура. На большем расстоянии (Рис. 1 а,б) ($l_2 \approx$ 50 мкм) кристаллические зерна просматриваются очень слабо. Зерна видны более отчетливо на расстоянии ($l_3 \approx$ 50-100 мкм), внутри зерен видны полосы скольжения (Рис. 1а,в). На более далеком расстоянии ($l_4 \approx$100-150 мкм) (Рис. 1а,г) проявляется мелкозернистая структура, характерная для недеформированного образца. Аналогичная эволюция наблюдалась для 10 и 15 часов трения. При этом закономерность проявлялась ярче с увеличением длительности трения.

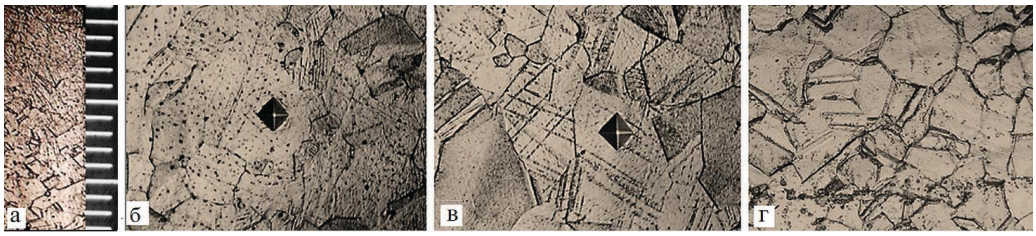


Рис. 1. Сталь AISI 316L, сухое трение «металл/металл»: AISI 316L/сталь Ст3сп, вид на плоскости в сечении, длительность трения t = 1 час; а– микроструктура образца при небольшом увеличении, вверху поверхность трения, 1 деление масштабной линейки равно 10 мкм; б-г – вид микроструктуры образца и отпечатков твердости, нанесенных на разных расстояниях от поверхности трения; горизонтальная сторона каждого кадра равна 180 мкм.

Так, протяженность деформированного слоя для 10 и 15 часов трения соответственно равнялась: $l_3 \approx$400 и 500 мкм. Изменение микроструктуры образцов в результате разной длительности процесса трения закономерно привело к изменению микромеханических характеристик, таких как микротвердость (H), модули пластичности (H/E) и сопротивления (H^3/E^2). Измерения показали, что трение вызывает возрастание параметров прочности и пластичности по сравнению с исходным недеформированным образцом, причем эти параметры увеличиваются по мере приближения к поверхности трения. Например, в недеформированной зоне образца величина параметров равна: H= 2,3 GPa, H/E= 0,016 и H^3/E^2= 0,6 GPa, тогда как в непосредственной близости от поверхности для 10 часов трения они соот-

ветственно составляют: 3,6 GPa, 0,026 и 1,6 GPa. Увеличение продолжительности процесса трения приводит к возрастанию исследованных параметров. Эффект возрастания твердости по мере приближения к поверхности трения можно отметить при сравнении отпечатков на Рис. 1б и 1в. Заметно, что величина отпечатка на рис. 1б меньше, чем на 1в, соответственно, твердость выше [7].

Особенности формирования НМС слоя при действии легкой ударной нагрузки на сталь AISI 316L.

Как отмечено в работе [8], распределение напряжений в материале при трении происходит иначе, чем при действии сосредоточенной нагрузки. В первом случае действующее усилие делится на две компоненты, нормальную (вертикальную) и касательную. Во втором случае вся нагрузка действует нормально (вертикально), поэтому при действии трения и ударной нагрузки следует ожидать как общих, так и отличительных особенностей в создании НМС слоя. На рис. 2 показаны три этапа эволюции микроструктуры стали AISI 316L, возникшей в результате действия ударной нагрузки (600 ударов).

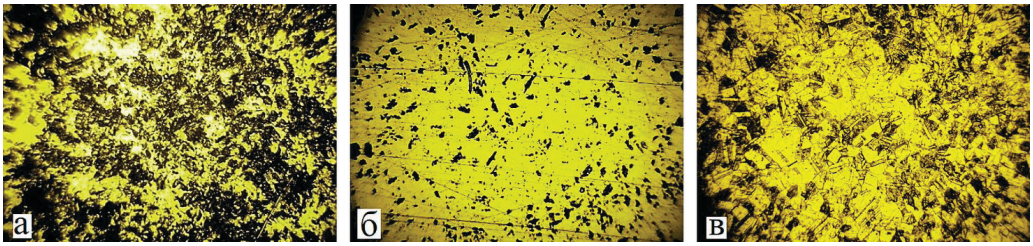


Рис. 2. Эволюция микроструктуры деформированной поверхности стали после 600 ударов. а – вид после нанесения ударов; б – вид после 5 мин. полировки; в - микроструктура после 5 мин. полировки и последующего химического травления в течение 15 мин. Увеличение: горизонтальная сторона каждого фотоснимка – 180 мкм.

После нанесения ударов (Рис. 2а) поверхность образца покрылась большим количеством неоднородно расположенных фигур различной величины и формы. Вид поверхности радикально изменился после 5 минут полировки, основное количество фигур сполировалось, осталось лишь незначительное число наиболее глубоких фигур (Рис. 2б). Еще большее изменение внесло химическое травление, которое выявило плотную фрагментированную структуру НМС слоя (Рис. 2в). Кристаллические зерна имеют произвольную ориентацию, их размер значительно меньше величины зерен, характерных для недеформированного образца (ср. с Рис.1г). Внутри многих зерен видны полосы скольжения, которые являются следствием дислокационных взаимодействий, вызывающих фрагментацию кристаллической структуры в НМС слое. Наличие полос скольжения в зернах четче проявляется на образце, подвергнутом 1200 ударам (Рис. 3).

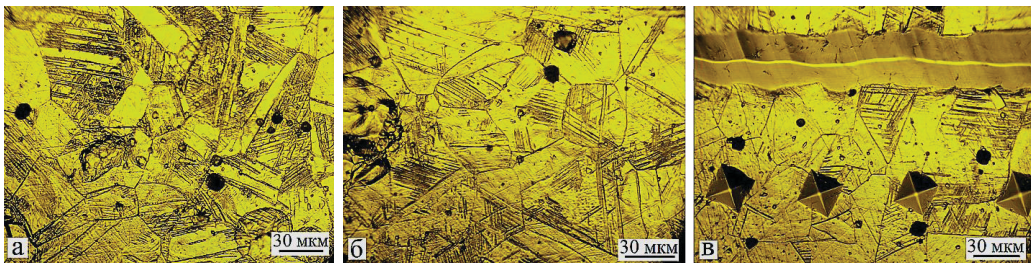


Рис. 3. Микроструктура поверхности стали после 1200 ударов. а – вид поверхности после снятия слоя 4,3 мкм и 15 мин. хим. травления; б – вид микроструктуры после снятия слоя 6,5 мкм и 15 мин. хим. травления; в - отпечатки и царапина, нанесенные на полированную и протравленную поверхность стали.

Их количество уменьшается при удалении от поверхности ударов (ср. Рис. 3а и 3б). Как показали наблюдения, эволюция изменения вида структуры деформации претерпевает аналогичные стадии для образцов, подвергнутых различному количеству ударов. Полосы скольжения и их различная ориентация являются факторами, которые существенно тормозят движение дислокаций и тем самым увеличивают параметры прочности и пластичности. Так, микротвердость (H) недеформированного образца AISI 316L равняется 2,3 ГПа и возрастает до значений H = 2,8 – 4,2 ГПа для образцов, деформированных разным числом ударов от 100 до 1200. На Рис. 3в показаны царапина и отпечатки, нанесенные на деформированную поверхность. Отчетливо видно, что индентор при своем движении испытывал неоднородное сопротвление со стороны кристаллической структуры, изменяя форму царапины и отпечатков, в то же время сохраняя высокую пластичность. Наблюдения показали, что деформированный ударами слой можно условно разделить на два подслоя: $\delta_1 < 0{,}5$ мкм и $\delta_2 \approx 1{,}5 – 15{,}0$ мкм в зависимости от числа ударов. Первый подслой отличается бóльшим числом фигур различной величины и формы. Второй подслой характеризуется фрагментированной структурой, дроблением зерен, интенсивными полосами скольжения внутри них. Дефектность и твердость второго подслоя уменьшаются по мере продвижения в глубь образца до достижения недеформированной зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено исследование специфики формирования упрочненного нано-микроструктурированного (НМС) поверхностного слоя на нержавеющей стали AISI 316L при легком трении и действии легкой ударной нагрузки. Отмечено, что большое влияние на изменение прочностных свойств материала оказывает величина приложенной нагрузки и способ ее воздействия. Исследования показали, что НМС слой, формирующийся в поверхностном слое нержавеющей стали AISI при трении и ударной нагрузке, имеет как общие, так и отличительные

особенности, которые по-разному могут влиять на поведение модифицированного материала.

К общим особенностям образования НМС слоя при трении и ударной нагрузке следует отнести следующие: 1 – возникновение в поверхностном слое образца неоднородных локальных напряжений, которые тем выше, чем выше величина приложенной нагрузки; 2 – фрагментация структуры, уменьшение размера зерен, увеличение их разориентации, появление полос скольжения внутри зерен; 3 – увеличение в НМС слое параметров прочности и пластичности; 4 – НМС слой может быть разделен на два подслоя: $\delta_1 < 0.5$ мкм для всех образцов; второй нижний подслой, имеющий различную протяженность в зависимости от длительности трения и числа ударов: $\delta_2 \approx 100 – 500$ мкм для трения и $\delta_2 \approx 1,5 – 15,0$ мкм для ударных нагрузок. С другой стороны, были отмечены некоторые отличия: разная степень упрочнения в НМС слое по сравнению с исходным недеформированным образцом, различный размер НМС слоя, бóльшая степень фрагментации структуры НМС слоя при ударном способе по сравнению с трением.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить специфические особенности создания фрагментированного НМС слоя для двух различных способов приложения внешней нагрузки. На базе полученных результатов можно высказать предположение, что метод трения мог бы быть использован, когда необходимо получить незначительно упрочненный НМС слой достаточно большой толщины (порядка 500 мкм). Метод действия ударных нагрузок является предпочтительнее для получения более упрочненного НМС слоя микрометровой толщины (порядка 15-20 мкм).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данное исследование было поддержано исследовательской субпрограммой **011201** Института прикладной физики Государственного Университета Молдовы и Финансируется Министерством образования и научных исследований Республики Молдова.

ЛИТЕРАТУРА

1. LANG F., XING Y., ZHU J., ZHAO Y. Study of the mechanical properties of a nanostructured surface layer on 316L stainless steel. *Advances in Mater. Sci. & Eng.* 2016, vol.2016, Article ID 7517616, 9 pages. http://dx.doi.org/10.1155/2016/7517616
2. PENG P., WANG K., WANG W., HAN P., et al. Relationship between microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L steel produced by selective laser melting. *Mater. Char.*, 2020, vol.163, 110283. Doi:10.1016/j.matchar.2020.110283

3. TAO N., WANG Z., TONG W., SUI M., et al. An investigation of surface nanocrystallization mechanism in Fe induced by surface mechanical attrition treatment. *Acta Mater.*, 2002, vol.50, p. 4603–4616. DOI:10.1016/S1359-6454(02)00310-5
4. LIU G., WANG S., LOU X., LU J., LU K. Low carbon steel with nanostructured surface layer induced by high-energy shot peening, *Scripta Mater.,* 2001, vol.44, no.8-9, p.1791-1795. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)00738-2
5. GRABCO D., ALEXANDROV S., LEU D., RAHVALOV V., SHIKIMAKA O. Behaviour of ductile materials under friction, extrusion and concentrated load action. *MJPhS*, 2004, vol.3, no.2, p.172-177.
6. ГРАБКО Д., ШИКИМАКА О., АЛЕКСАНДРОВ С., ХАРЯ Е., и др. Эволюция изменения микроструктуры материала по мере удаления от поверхности фрикционного контакта в условиях интенсивной пластической деформации. *XVIII Петербургские чтения по проблемам прочности и роста кристаллов*, Сб. Трудов, ч. I, С.-Петербург, 2008, с.152-154.
7. GRABCO D., SHIKIMAKA, O., PYRTSAC C., BARBOS Z., et al. Nano- and micromechanical parameters of AISI 316L steel. *Surf. Eng. Appl. Electr.,* 2020, vol.56, no.6, p.719–726. DOI:10.5281/zenodo.3640700
8. GRABCO D., SHIKIMAKA O., PYRTSAC C., BARBOS Z., et al. Microstructures generated in AISI 316L stainless steel by Vickers and Berkovich indentations**.** *MSEA***,** 2021, vol. 805C, 140597. doi.org/10.1016/j.msea.2020.140597