

3. Пянко, А.В. Композиционное покрытие олово – никель – диоксид титана / А. В. Пянко [и др.] // Неорганические материалы. – 2019. – Т. 55. № 6. – С. 609–616.

4. Pianka, H. Effects of incorporating TiO₂ aggregates on the growth, anticorrosion, and antibacterial properties of electrodeposited multifunctional coatings based on Sn-Ni materials / H. Pianka [etc.] // *Coatings*. – 2024. – No. 14. – P. 1344–1373. <https://doi.org/10.3390/coatings14111344>

УДК 669-1

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОНИКЕЛЕВЫХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ТРИП СТАЛЕЙ

П.Л. ЦЫБА¹, С.Н. ЛЕЖНЕВ², Д.В. КУИС³

¹Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

²Рудненский индустриальный университет, Рудный, Казахстан

³Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь

Уже не одно десятилетие в различных отраслях промышленности, особенно в авиа- и автомобилестроении, в связи с растущими требованиями к безопасности, надежности и уменьшению веса элементов конструкции и деталей машин, наблюдается устойчивая тенденция к применению материалов, обладающих высокими показателями не только по прочности, но и одновременно по пластичности. Конструкционные элементы из обычных сталей повсеместно заменяются на пластики и композиты, а облегченные силовые элементы конструкций на высокопрочные стали с требованием повышенной пластичности, чтобы при аварии происходило не хрупкое разрушение, а управляемое смятие прочного силового каркаса с адсорбированием большей энергии удара за счет повышенной прочности и достаточной пластичности материала. Как известно большинство традиционных способов повышения прочностных характеристик металлоизделий, такие как термообработка; деформационное упрочнение, и в частности способами обработки давлением, реализующими в процессе деформирования интенсивные пластические деформации; термомеханическая обработка, в большинстве случаев приводят к снижению пластических свойств материалов данных металлоизделий. При производстве различных металлоизделий ответственного назначения данная проблема в настоящее время частично решена

применением стали с остаточным аустенитом, известная в международной практике как ТРИП сталь. Эта сталь имеет многофазную структуру, состоящую из феррита, бейнита, остаточного аустенита и мартенсита. Главной особенностью данного материала является присутствие в микроструктуре данного материала метастабильного аустенита и наличие так называемого ТРИП-эффекта, который проявляется в трансформации кубической гранецентрированной решётки аустенита в объемно-центрированную решётку мартенсита в результате коллективного сдвига плоскостей при приложении нагрузки. Именно данная особенность ТРИП сталей существенно влияет на комплекс их механических свойств и позволяет добиться, как повышения прочностных, так и пластических свойств.

Одной из основных причин отсутствия широкого промышленного применения данных сталей является высокая стоимость их производства, так как они все высоколегированные. Поэтому в настоящее время перед учеными и производителями ТРИП сталей стоит задача по разработке новых низколегированных марок сталей, в том числе и ТРИП сталей, обладающих все тем же повышенным уровнем механических свойств. В частности этой проблемой занимаются ученые Института черной металлургии Технического университета - Фрайбергская горная академия (TUBAF). Начиная с 2020 года по настоящее время в академии реализуется проект №44797210 «Alloy and structure design of austenitic cast Cr-Ni-Cu-N steel exhibiting TRIP/TWIP properties for cold massive forming», который финансируется Немецкой исследовательской ассоциацией. Так же в академии проводятся и инициативные исследования в области выплавки, обработки и исследования структуры и свойств экономнолегированных аустенитных сталей различного химического состава. По полученным в рамках проводимых исследований результатам ими был опубликован целый ряд научных работ в данном направлении, в том числе работы [1-8]. При этом одно из направлений, проводимых в Институте черной металлургии TUBAF исследований, связано с выплавкой и исследованием новых никельсберегающих метастабильных ТРИП сталей. В первую очередь это связано с тем, что высокое содержание никеля значительно повышает стоимость стали [9, 10]. Также надо отметить, что по данным ВОЗ, никель - один из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды. Повышенное содержание никеля в окружающей среде (согласно классификации Международного агентства исследований рака (IARC) металлический никель (пыль) и гипосульфит никеля являются канцерогенами и опасны в концентрациях 0,0004–0,4 и 0,0001–0,1 мг/м³, соответственно [11]) приводит к появлению эндемических заболеваний, бронхиального рака.

Другой немаловажной нишей применения безникелевых высокопрочных сталей является ядерная энергетика и перспективные термо-ядерные энергетические установки [12]. Никель при облучении нейтронами распадется очень токсичные и долгоживущие изотопы [13]. При среднем содержании никеля в 10% в типичных сталях, применяемых для конструкций самого корпуса реактора и трубопроводов близких к активной зоне, проблема наведенной радиоактивности этих деталей, составляющих основу реактора, очень велика [14-15]. И если, с более известной проблемой утилизации и переработки самого ядерного топлива (например, в МОХ-топливо [15]) все относительно просто, то, что делать с многотонными массивными корпусами реакторов не вполне ясно. Эта, ранее незаметная проблема, будет только нарастать с растущей декомиссией старых энергоблоков, массово построенных в 70-е и 80-е годы. Получение нового класса безникелевых реакторных сталей позволит приблизиться к решению утилизации корпусов реакторов.

На основе выше сказанного можно сделать вывод, что исследования в области выплавки и последующей деформационной обработки низконикелевых метастабильных ТРИП сталей до сих пор являются актуальными исследованиями. Так как данные (никельсберегающие метастабильные) ТРИП стали с каждым годом будут находить все более широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе они могут найти свое применение и при производстве беспилотных аппаратов.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP26100119).

ЛИТЕРАТУРА

1. Schröder C., Wendler M., Volkova O., Weiß A. Microstructure and mechanical properties of an austenitic crmnimon spring steel strip with a reduced ni content// Crystals, 10 (2020), 392.
2. Günther J., Lehnert R., Wagner R., Burkhardt C., Wendler M., Volkova O., Biermann H., Niendorf T. Effect of compositional variation induced by EBM processing on deformation behaviour and phase stability of austenitic Cr-Mn-Ni TRIP steel// JOM, 72 (2020), 1052-1064.
3. Quitzke C., Huang Q., Biermann H., Volkova O., Wendler M. Influence of C and N on strain-induced martensite formation in Fe-15Cr-7Mn-4Ni-0.5Si austenitic steel// Materials, 14 (2021), 6502.
4. Alsultan S., Quitzke C., Cheng Z., Krüger L., Volkova O., Wendler M. Strain-induced martensite formation and mechanical properties of Fe-

19Cr-4Ni-3Mn-0.15N-0.15C austenitic stainless steel at cryogenic temperature// Steel Research Int., (2021), 2000611.

5. Schröder C., Volkova O., Wendler M. Influence of strain rate on the tensile properties of metastable austenitic stainless CrNi and CrMnNi spring steels// Materials Science and Engineering: A, 850 (2022), 143507.

6. Scherbring S., Chen G., Veltel B., Bartsch G., Richter J., Vollmer M., Blankenburg M., Shyamal, Volkova O., Niendorf T., Lienert U., Sahu P., Mola J. Microstructural constituents and mechanical properties of low-density Fe-Cr-Ni-Mn-Al-C stainless steels// Materials, 15 (2022), 5121.

7. Hauser M., Volkova O., Wendler M. Modelling of mechanical properties of metastable austenitic Cr-Mn-Ni steels with TRIP effect// Steel Research Int., (2023), 2300058.

8. Nitzsche P., Hauser M., Lehnert N., Weidner A., Henkel S., Wendler M., Freudenberger J., Volkova O., Kräusel V., Biermann H. Quasi-static tensile and fatigue behaviour of a metastable austenitic stainless Cr-Ni-Cu-N steel// Theoretical and Applied Fracture Mechanics, (2024), 104571.

9. Tensile and impact properties of low nickel maraging steel/ Sha W., Chen Z., Geriletu X. [et al.] // Materials Science and Engineering A, 2013. V.587. - P. 301–303.

10. Sibanda M., Vismer S. L., Knutsen R. D. Consideration of reduced nickel containing austenitic stainless steels for forming applications// Materials Letters. 1994. V.21. № 2. - P. 203–207.

11. Дерябина В.И., Акользина Т.В., Нохойжав Гэрэлтуяа. Новые подходы к определению никеля методом вольтамперометрии// Фундаментальные исследования. 2013. № 8 (часть 3). – С. 590-594.

12. Structural materials for heavy liquid metal cooled fast reactors/ Серия TECDOC. - Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2021. - 252 с.

13. Pavliuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bespala E.V., Zakharova E.V., Ermolaev V.M., Volkova A.G. Experience of on-site disposal of production uranium-graphite nuclear reactor // Journal of Environmental Radioactivity, 2018. T. 184–185. - P. 22–31.

14. El Mokhtari B., Chetaine A., Amsil H., Embarch K., Benchrif A., Laraki K., Marah H. Modeling and simulating the induced effect on the steel collimator plug used in the PGAA Facility of the moroccan TRIGA Mark-II reactor under different neutron irradiation levels// Applied Radiation and Isotopes. 170 (2021), 109620.

15. Mixed oxide fuel (MOX) exploitation and destruction in power reactors/ Merz E.R., Walter C.E., Pshakin G.M. - Dordrecht: Springer Netherlands, 1995. - 349 p.

16. IAEA waste from innovative types of reactors and fuel cycles: A Preliminary Study / Серия по ядерной энергии МАГАТЭ. - Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2019. - 148 с.