

Использование криогенного охлаждения при волочении нержавеющей проволоки

¹***ВОЛОКИТИНА Ирина Евгеньевна**, PhD, доцент, irinka.vav@mail.ru,

¹**ПАНИН Евгений Александрович**, PhD, доцент, cooper802@mail.ru,

¹**ДЕНИСОВА Анастасия Игоревна**, докторант, anastassiya.i.denisova@arcelormittal.com,

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», пр. Республики, 30, Темиртау, Казахстан,

*автор-корреспондент.

Аннотация. При изготовлении проволоки с высокими эксплуатационными и механическими свойствами использование высоких суммарных степеней обжатия нерационально, так как холодная пластическая деформация снижает диаметр проволоки, а при горячем деформировании исходный диаметр проволоки имеет свои ограничения. Поэтому обработка проволоки термомеханическим способом имеет огромный потенциал для сокращения затрат и повышения качества продукции. В статье разработана технология термомеханической обработки нержавеющей проволоки, которая заключается в предварительной термической обработке для получения аустенитной структуры и традиционное волочение с последующим криогенным охлаждением. В результате такой обработки получены ультрамелкозернистая структура, состоящая из смеси аустенита и α – мартенсита, и высокие прочностные и пластические свойства. При волочении с использованием криогенного охлаждения получена структура со средним размером зерна 1 мкм, а при комнатной температуре получена микроструктура размером 2 мкм.

Ключевые слова: волочение, проволока, нержавеющая сталь, термомеханическая обработка, микроструктура, механические свойства.

Введение

В настоящее время одними из самых подающих надежды направлений усовершенствования инновационных технологий получения длинномерных полуфабрикатов являются совмещенные технологии [1-2]. Такие технологии способствуют развитию новых процессов, позволяющих улучшить эффективность производства, а также в результате сокращения количества малопродуктивных операций значительно увеличить производительность труда. Также совмещение инновационных современных технологий способствует сокращению производственных площадей. Последние несколько лет интерес ученых привлекают материалы, которые характеризуются ультрамелкозернистыми и наноструктурами, из-за того, что они обладают высокими прочностными свойствами. Но обычно значительное увеличение прочности, полученное в результате накопления объемной доли поверхностных границ зерен, приводит к параллельному снижению пластических свойств. В результате этого будет значительно снижаться область применения

подобных металлов. А постоянно растущие требования, которые предъявляют к сегодняшним материалам, подталкивают совершенствовать технологии их изготовления. Необходимо достичь поставленной цели выигранным сочетанием высокой прочности и пластичности. В результате вышесказанного разработка технологии, позволяющей повысить прочностные и эксплуатационные свойства проволоки из аустенитной хромоникелевой стали термомеханической обработкой, является актуальной задачей.

Проволока всегда была одним из основных видов металлопроката, так как по форме поперечного сечения изготавливается из различных профилей, но чаще всего круглых. При том развитии современной промышленности, какое произошло на сегодняшний момент, металлы становятся все более востребованными. Технологии производства проволоки, используемые в настоящее время казахстанскими компаниями, можно смело назвать устаревшими, поскольку они характеризуются такими негативными факторами, как высокое энергопотребление и низкая производительность. Ежегодное

мировое производство аустенитных коррозионностойких сталей составляет около 22 миллионов тонн в год, что составляет 80% мирового рынка всех коррозионностойких сталей [3]. Основным преимуществом таких сталей являются их высокие эксплуатационные характеристики: коррозионная стойкость, пластичность и прочность. Поэтому аустенитные коррозионностойкие стали широко используются в качестве конструкционного материала в металлургии, приборостроении, различных отраслях машиностроения и т.д. Важным свойством таких сталей является то, что после закалки они имеют чисто аустенитную структуру и подвергаются γ - α превращению во время пластической деформации. И чем выше концентрация мартенсита, тем ниже температура деформации и выше степень деформации. При том что, как правило, даже после очень интенсивной деформации часть аустенита может не превратиться в мартенсит [4, 5]. Поэтому при производстве проволоки из стали 12X18H10T и ее аналогов с высокими прочностными свойствами рекомендуется деформация 90-92% [6, 7]. И даже при таких обжатиях в структуре образовывается только 75% мартенсита. А также получается наилучшее сочетание пластических и прочностных свойств. При деформировании проволоки средних и больших сечений использование таких высоких обжатий не целесообразно, так как полученный диаметр проволоки всегда имеет свои ограничения. Применение же волочения всегда приводит к существенному уменьшению диаметра такой проволоки.

В последнее время наблюдается большой интерес к использованию криогенного охлаждения при деформировании методами обработки металлов давлением (ОМД) с применением жидкого азота [8, 9]. В этом случае обработка не сопровождается рекристаллизацией или динамическим возвратом. Это позволяет более интенсивно измельчить микроструктуру. Еще одним преимуществом такой деформации является сильное повышение прочностных свойств при меньших степенях деформации по сравнению с традиционными методами ОМД.

Существуют исследования [8, 9], которые были проведены в области криогенных деформаций, в которых подтверждается эффективность такой обработки с точки зрения измельчения структурных составляющих. Так, в работах [8, 10] было доказано, что микроструктура исходной крупнозернистой меди и алюминия после криогенной деформации отличается существенно меньшим размером зерен, чем после обычной холодной деформации. Поэтому предлагается

применение криогенного охлаждения сразу при выходе проволоки из волоки с помощью жидкого азота, что даст более выгодный компромисс между прочностью и пластичностью материала. Это может быть достигнуто благодаря повышенной подвижности дислокаций и, вместе с тем, их повышенной плотности. Когда мартенситное превращение протекает при температуре ниже температуры начала мартенситного превращения, возникает большая разность в свободных энергиях, что приводит к резкому уменьшению размера зерна по сравнению со стабильным ростом.

Материал и методика исследования

В качестве образцов была использована проволока из стали марки 08X16H15M3 в термически обработанном состоянии для получения исходной равноосной аустенитной структуры, так как аустенитная структура «наклепывается» значительно сильнее, чем δ -феррит, который проявляет большее сопротивление деформированию из-за своей повышенной твердости. Такое состояние было получено с помощью закалки при температуре 1050°C, выдержке при этой температуре 30 мин и охлаждении в воде.

Лабораторный эксперимент проводили на промышленном волочильном стане В-1/550 М. Деформирование осуществляли в три прохода при криогенной и для сравнения при комнатной температурах. Волочение нержавеющей проволоки при комнатной температуре производили по стандартной методике: конец проволоки заостряли с помощью острильного станка и задавали в волоку, установленную в волокодержателе, затем осуществляли ее захват заправочными клещами и после набора на барабане 3 витков проволоки стан останавливали. Волочение проволоки с криогенным охлаждением является совмещенным процессом ОМД с последующей термической обработкой, который осуществляется в одной линии агрегата. Процесс задачи проволоки является таким же, как и при деформировании при комнатной температуре. Потом заостренный конец проволоки задается в волоку, после чего пропускается через пустую камеру-резервуар, в которой осуществляется криогенное охлаждение. Данная камера-резервуар устанавливается в линии стана сразу же за волокодержателем. Затем конец проволоки закрепляется на барабане волочильного стана и наматывается на барабан. Когда волочильный стан выходит на рабочую скорость деформирования происходит заполнение камеры-резервуара жидким азотом. Камера-резервуар снабжена рециркулярной системой подачи азота. Обжатия при воло-

чении стали должно составлять не более 10-12%, учитывая особенности совмещенного процесса, принимаем решение снизить до 5-7%, т.е. с 6 мм за один проход протягиваем до 5,6 мм, далее второй проход с 5,6 мм до 5,3 мм и третий проход с 5,3 мм до 5 мм.

При волочении проволока претерпевает в очаге деформации интенсивный разогрев, температура увеличивается до 120-150°C после чего нержавеющая проволока попадает в камеру интенсивного охлаждения, где и происходит ее криогенное охлаждение до -196°C.

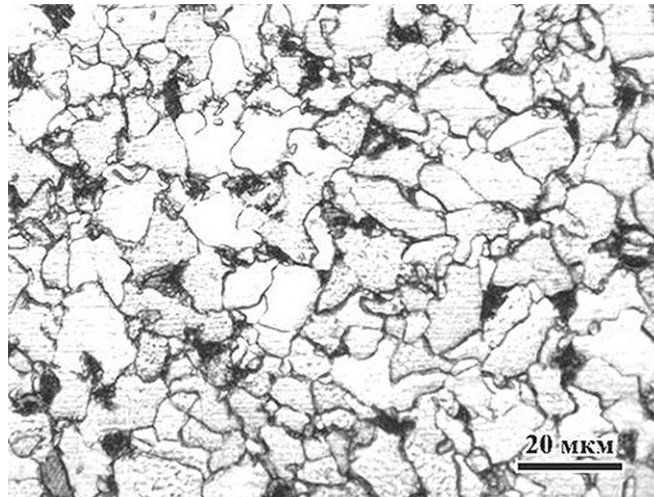
Металлографический анализ выполняли на оптическом микроскопе фирмы Leica.

Механические испытания на растяжения проводились при комнатной температуре на стандартных цилиндрических образцах по рекомендациям ГОСТ 1497-84 на машине Instron 5882.

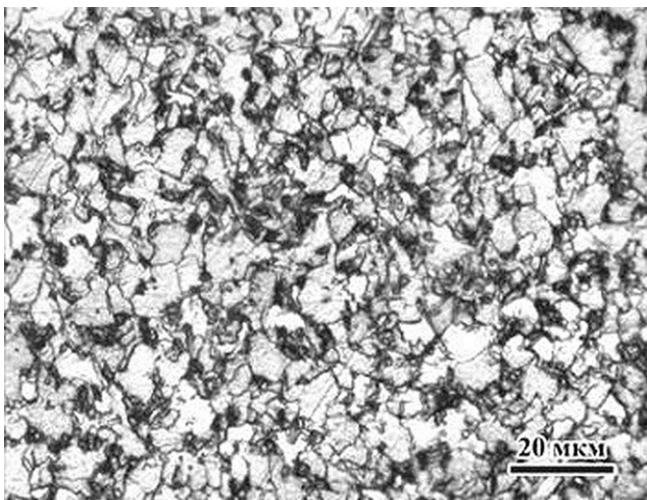
Результаты и их обсуждение

Исходная микроструктура нержавеющей стали 08Х16Н15М3 до волочения представлена крупнозернистыми зёрнами аустенита полиэдрической формы. Средний размер зерна составляет 20 мкм, в структуре содержится небольшое количество двойников (см. рисунок а). Микроструктура проволоки, полученная после волочения при комнатной температуре и с использованием криогенного охлаждения, показана на рисунке б-в.

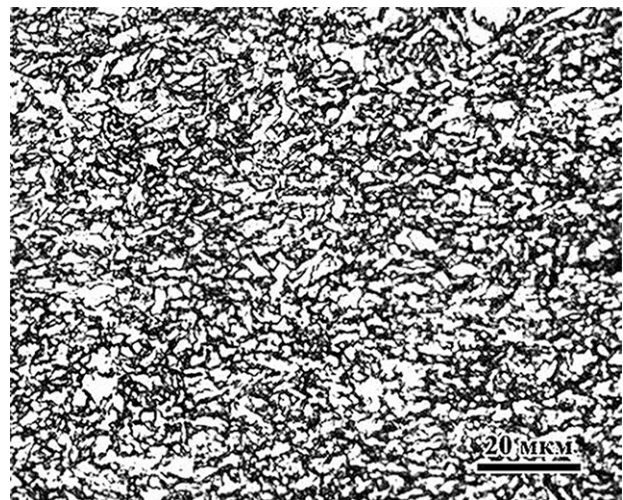
Анализ микроструктуры проволоки, деформированной при комнатной температуре, показал, что 3 цикла деформирования приводит к формированию текстурованной структуры (рисунок б). Даже в результате высокосуммарного обжатия, приобретенного нержавеющей проволокой в процессе деформирования не все зёрна одинаково измельчаются и разворачиваются в



а



б



в

а – исходная структура, б – волочение при комнатной температуре,
в – волочение при криогенной температуре
Микроструктура стали марки 08Х16Н15М3

направлении деформации. При волочении с использованием криогенного охлаждения получена структура со средним размером зерна 1 мкм (рисунок в), а при комнатной температуре получена микроструктура размером 2 мкм (рисунок б). После деформирования при обеих температурах была получена микроструктура, состоящая из смеси α – мартенсита и аустенита.

Проведенные испытания на растяжение показали, что в исходном состоянии проволока имеет следующие характеристики: предел текучести – 243 МПа и предел прочности – 605 МПа, относительное удлинение – 55%. Волочение при криогенной температуре приводит к росту предела прочности до 1050 МПа по сравнению с исходным состоянием. Предел текучести увеличивается до 920 МПа. Значение пластичности снижается по сравнению с исходным состоянием до 35%. В образцах, деформированных при комнатной температуре, был получен следующий комплекс механических свойств: предел прочности – 1010 МПа, предел текучести – 860 МПа. Значение пластичности снижается по сравнению с исходным состоянием до 18%.

Выводы

Разработана новая совмещенная технология термомеханической обработки нержавеющей проволоки, отличительной особенностью которой является криогенное охлаждение проволоки непосредственно после выхода проволоки из волоки. Высокая прочность, хорошая пластичность и технологичность исследуемой проволоки создает перспективу для использования этой проволоки в машиностроении, так как такая проволока имеет повышенный запас пластичности по сравнению с традиционным процессом волочения, что позволяет проводить ее дальнейшую переработку с большими степенями деформации без проведения промежуточных отжигов. Повышенные прочностные и пластические свойства проволоки продеформированной при криогенной температуре можно объяснить наличием повышенного содержания мартенсита, а твердость мартенсита деформации выше, чем аустенита.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP19576369).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andreev V.A., Yusupov V.S., Perkas M.M., Prosvirnin V.V., Shelest A.E., Prokoshkin S.D., Khmelevskaya I.Yu., Korotitskii A.V., Bondareva S.A., Karelin R.D. Mechanical and Functional Properties of Commercial Alloy TN-1 Semiproducts Fabricated by Warm Rotary Forging and ECAP // Russian Metallurgy (Metally). – 2017. – Vol. 10. – Pp. 890-894.
2. Naizabekov A., Volokitina I., Volokitin A., Panin E. Structure and mechanical properties of steel in the process «pressing-drawing» // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – Vol. 28. – Pp. 1762-1771.
3. Cunat, P.J. Aciers inoxydables: Propriétés, résistance à la corrosion / P.J. Cunat // Techniques de l'ingénieur. – 2000. – No. M 4541. – C. 1-16.
4. S.S. Kazemi, M. Homayounfard, M. Ganjiani, N. Soltani. Numerical and Experimental Analysis of Damage Evolution and Martensitic Transformation in AISI 304 Austenitic Stainless Steel at Cryogenic Temperature. Progress in Materials Science. 2019, Vol. 53, 9. Pp. 893-979.
5. M. Glatt, H. Hotz, P. Kölsch, A. Mukherjee, B. Kirsch, J.C. Aurich. Predicting the martensite content of metastable austenitic steels after cryogenic turning using machine learning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2021, V. 115, 749-757.
6. Xu, W. Modelling and characterization of chi-phase grain boundary precipitation during aging of Fe-Cr-Ni-Mo stainless steel / W. Xu, D. S. Martin, P.E.J. Rivera D'iaz del Castillo, S. van der Zwaag // Materials Science and Engineering A. 2007. V. 467. Pp. 24-32.
7. Bidulský R., Bidulská J., Gobber F.S., Kvačák T., Petroušek P., Actis-Grande M., Weiss K-P., Manfredi D., Case Study of the Tensile Fracture Investigation of Additive Manufactured Austenitic Stainless Steels Treated at Cryogenic Conditions // Materials. – 2020. – Vol. 13. No. 3328.
8. Panigrahi S.K., Jayaganthan R., Pancholi V., Gupta M. A DSC study on the precipitation kinetics of cryorolled Al 6063 alloy // Materials Chemistry and Physics. – 2010. – No. 12. – Pp. 188-193.

9. Volokitina I., Siziakova E., Fediuk R., Kolesnikov A. Development of a Thermomechanical Treatment Mode for Stainless-Steel Rings // Materials. – 2022. – Vol. 15. – 4930.
10. Ramesh Kumar S., Kondaiah Gudimetla, Tejaswi B., Ravisankar B. Effect of Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg Alloy Processed by ECAP at Room Temperature and Cryo Temperature // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2017. – Vol. 70. – Pp. 639-648.

Тот баспайтын сымды тарту кезінде криогендік салқындатуды қолдану

¹***ВОЛОКИТИНА Ирина Евгеньевна**, PhD, доцент, irinka.vav@mail.ru,

¹**ПАНИН Евгений Александрович**, PhD, доцент, cooper802@mail.ru,

¹**ДЕНИСОВА Анастасия Игоревна**, докторант, anastassiya.i.denissova@arcelormittal.com,

¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Республика даңғылы, 30, Теміртау, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жоғары өнімділік және механикалық қасиеттері бар сым өндірісінде жоғары жалпы қысу дәрежелерін пайдалану ұтымсыз, өйткені суық пластикалық деформация сымның диаметрін төмендетеді, ал ыстық деформация кезінде сымның бастапқы диаметрінің шектеулері болады. Сондықтан сымды термомеханикалық өңдеу шығындарды азайтуға және өнімнің сапасын жақсартуға үлкен әлеуетке ие. Мақалада тот баспайтын сымды термомеханикалық өңдеу технологиясы әзірленген, ол аустениттік құрылымды алу үшін алдын ала термиялық өңдеуден және кейіннен криогендік салқындатумен дәстүрлі тартудан тұрады. Мұндай өңдеу нәтижесінде аустенит пен α – мартенсит қоспасынан және жоғары беріктік пен пластикалық қасиеттерден тұратын ультра ұсақ түйіршікті құрылым алынады. Криогендік салқындатуды қолдана отырып тарту кезінде орташа астық мөлшері 1 мкм болатын құрылым алынады, ал бөлме температурасында 2 мкм микроқұрылым алынады.

Кілт сөздер: сызу, сым, тот баспайтын болат, термомеханикалық өңдеу, микроқұрылым, механикалық қасиеттер.

Use of Cryogenic Cooling During Stainless Wire Drawing

¹***VOLOKITINA Irina**, PhD, Associate Professor, irinka.vav@mail.ru,

¹**PANIN Evgeny**, PhD, Associate Professor, cooper802@mail.ru,

¹**DENISOVA Anastasia**, Doctoral Student, anastassiya.i.denissova@arcelormittal.com,

¹NPJSC «Karaganda Industrial University», Republic Avenue, 30, Temirtau, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. In the manufacture of wire with high operational and mechanical properties, the use of high total degrees of compression is irrational, since cold plastic deformation reduces the diameter of the wire, and with hot deformation the initial diameter of the wire has its limitations. Therefore, wire processing by thermomechanical method has a huge potential to reduce costs and improve product quality. The article develops a technology of thermomechanical processing of stainless wire, which consists in preliminary heat treatment to obtain an austenitic structure and traditional drawing followed by cryogenic cooling. As a result of such processing, an ultrafine-grained structure consisting of a mixture of austenite and α – martensite and high strength and plastic properties were obtained. When drawing using cryogenic cooling, a structure with an average grain size of 1 microns was obtained, and a microstructure of 2 microns was obtained at ambient temperature.

Keywords: drawing, wire, stainless steel, thermomechanical processing, microstructure, mechanical properties.

REFERENCES

1. Andreev V.A., Yusupov V.S., Perkas M.M., Prosvirnin V.V., Shelest A.E., Prokoshkin S.D., Khmelevskaya I.Yu., Korotitskii A.V., Bondareva S.A., Karelin R.D. Mechanical and Functional Properties of Commercial Alloy TN-1 Semiproducts Fabricated by Warm Rotary Forging and ECAP // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2017. – Vol. 10. – Pp. 890-894.
2. Naizabekov A., Volokitina I., Volokitin A., Panin E. Structure and mechanical properties of steel in the process «pressing-drawing» // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2019. – Vol. 28. – Pp. 1762-1771.
3. Cunat, P.J. Aciers inoxydables: Propriétés, résistance à la corrosion / P.J. Cunat // *Techniques de l'ingénieur*. – 2000. – No. M 4541. – C. 1-16.
4. S.S. Kazemi, M. Homayounfard, M. Ganjiani, N. Soltani. Numerical and Experimental Analysis of Damage Evolution and Martensitic Transformation in AISI 304 Austenitic Stainless Steel at Cryogenic Temperature. *Progress in Materials Science*. 2019, Vol. 53, 9. Pp. 893-979.
5. M. Glatt, H. Hotz, P. Kölsch, A. Mukherjee, B. Kirsch, J.C. Aurich. Predicting the martensite content of metastable austenitic steels after cryogenic turning using machine learning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2021, V. 115, 749-757.
6. Xu, W. Modelling and characterization of chi-phase grain boundary precipitation during aging of Fe-Cr-Ni-Mo stainless steel / W. Xu, D. S. Martin, P.E.J. Rivera D'iaz del Castillo, S. van der Zwaag // *Materials Science and Engineering A*. 2007. V. 467. Pp. 24-32.
7. Bidulský R., Bidulská J., Gobber F.S., Kvačák T., Petroušek P., Actis-Grande M., Weiss K-P., Manfredi D., Case Study of the Tensile Fracture Investigation of Additive Manufactured Austenitic Stainless Steels Treated at Cryogenic Conditions // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. No. 3328.
8. Panigrahi S.K., Jayaganthan R., Pancholi V., Gupta M. A DSC study on the precipitation kinetics of cryorolled Al 6063 alloy // *Materials Chemistry and Physics*. – 2010. – No. 12. – Pp. 188-193.
9. Volokitina I., Siziakova E., Fediuk R., Kolesnikov A. Development of a Thermomechanical Treatment Mode for Stainless-Steel Rings // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – 4930.
10. Ramesh Kumar S., Kondaiah Gudimetla, Tejaswi B., Ravisankar B. Effect of Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg Alloy Processed by ECAP at Room Temperature and Cryo Temperature // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2017. – Vol. 70. – Pp. 639-648.