

## ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

*Айасрах Х.Х., Туманова Е.Ю.*

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

**Ключевые слова:** никелевые сплавы, суперсплавы, тепловложение при сварке, горячие трещины, дерево проблем, дефекты при сварке, погонная энергия сварки.

**Аннотация.** Статья является обзорным материалом о разновидностях, свойствах и особенностях сварки никелевых сплавов с целью показать все возможности и проблематику эффективного использования данных материалов в промышленности. В материале дана небольшая историческая справка о начале промышленного применения никеля и приводятся основные современные марки никелевых сплавов. Три характеристики никелевых сплавов, которые позволили некоторым никелевым сплавам называться суперсплавами – это высокая прочность, стойкость к коррозии и термическая стабильность. В статье показаны механические характеристики и описаны особенности поведения материала при сварке. Несмотря на хорошую свариваемость, сварка никелевых сплавов сопряжена с рядом трудностей. На первый взгляд дефекты сварных швов характеризуются комбинацией случайных событий, но в действительности все причины, приводящие к дефектам, поддаются структуризации. Анализ причин возникновения дефектов приводится в виде графоаналитического метода «дерево проблем». На основании проведенного обзора выдвинуто ряд гипотез об совершенствовании и успешном применении сварки никелевых сплавов в производство.

## FEATURES OF WELDING NICKEL-BASED ALLOYS

*Ayasrah H.K., Tumanova E.Yu.*

*Ufa State Petroleum Technical University, Ufa*

**Keywords:** nickel alloys, superalloys, heat input during welding, hot cracks, problem tree, welding defects, linear welding energy.

**Abstract.** The article is an overview of the varieties, properties and features of welding nickel alloys in order to show all the possibilities and problems of effective use of these materials in industry. The material provides a brief historical background on the beginning of industrial use of nickel and provides the main modern grades of nickel alloys. The three characteristics of nickel alloys that have allowed some nickel alloys to be called superalloys are high strength, corrosion resistance and thermal stability. The article shows the mechanical characteristics and describes the behavior of the material during welding. Despite the good weldability, welding of nickel alloys is associated with a number of difficulties. At first glance, weld defects are characterized by a combination of random events, but in reality all the causes leading to defects can be structured. The analysis of the causes of defects is presented in the form of the graphoanalytic method "problem tree". Based on the review, a number of hypotheses have been put forward about the improvement and successful application of nickel alloy welding in production.

### Введение

Первое упоминание о никелевом сплаве, как о материале «белая медь» относится к 200-му году до нашей эры, так в Китае называли никельсеребряный сплав. В 1751 году немецкий ученый Аксель Фредрик Кронстедт смог выделить никель из минерала под названием никколит и после этого во второй половине 18-го века стали появляться никелевые сплавы в Европе. Первые никелевые сплавы, носили название «германское серебро» и содержали кроме никеля еще медь и цинк. Официальное же название этого сплава нейзильбер (Neusilber), что в дословном переводе означает "новое серебро". Никель придает сплавам устойчивость к окислению и высокую твердость, что открывает широкие возможности для применения данного сплава.

Сплавы из никеля дополнительными компонентами содержат чаще всего железо, медь или титан. Эти сплавы изготавливают в различных формах: проволока, листы или трубы. Благодаря никелю, эти сплавы обладают исключительным сопротивлением коррозии, высокой прочностью при повышенных температурах и отличными механическими свойствами. Поэтому сплавы из никеля широко применяются в аэрокосмической

промышленности, в отрасли химических процессов, морской инженерии и производстве энергии. Никелевые сплавы также часто используются в медицинском оборудовании, поскольку они биосовместимы и устойчивы к коррозии от жидкостей организма. Никель часто наносят в виде покрытия на некоторые металлы в качестве защитной меры от коррозии. Сплавы из никеля обладают своими исключительными свойствами благодаря сильным связям между атомами в кристаллической решетке металла [1]. Это делает сплав идеальным для применения в областях, требующих устойчивости к износу. Никелевые сплавы популярны также как термостойкие материалы, так как могут выдерживать температуры до 1050°C, и даже с временным воздействием температур до 1200°C, что находится в районе температур начала плавления материала.

Многие свойства никеля позволяют получать сплавы способные работать в условиях воздействия агрессивной среды при экстремальных температурно-силовых режимах. Способность проявлять свойства, превышающие ожидаемые характеристики, дало возможность называть сплавы на основе никеля суперсплавами. С повышением температуры прочность большинства материалов уменьшается, но сплавы на основе никеля являются исключением, при повышении температуры образуется зона повышенной прочности с аномальным пределом текучести. Никелевые суперсплавы обладают исключительным сопротивлением ползучести из-за их микроструктуры [2].

Приведем общие характеристики никелевых сплавов:

- стойкость к коррозии и окислению, что делает их идеальными для использования в агрессивных средах;
- высокая прочность и упругость при повышенных температурах;
- термостойкость и способность длительно непрерывно выдерживать температуры до 980°C;
- пластичность и способность выдерживать удары без внезапного разрыва;
- низкая теплопроводность является хорошим качеством эксплуатации при высоких температурах, чтобы ограничить передачу тепла к другим компонентам;
- низкий коэффициент теплового расширения позволяет сохранять стабильность размеров для прецизионных приложений.

#### **Химический состав и свойства сплавов на основе никеля**

При создании сплава обязательным условием является эффективное сочетание металлов путем образования межатомных связей. Элементы, которые могут быть легированы с никелем, это железо (Fe), хром (Cr), алюминий (Al), молибден (Mo), медь (Cu), кобальт (Co) и титан (Ti).

Двумя наиболее распространенными типами сплавов на основе никеля являются Инконель и Инколой. Сплавы Инколой – это никелевые сплавы, в основном с хромом. В настоящее время в семействе Инколой различают более десяти различных марок, среди которых Инколой 825 и Инколой 925. Сплавы Инконель – это никелевые сплавы, также в основном сплавленные с хромом. Однако содержание в них никеля обычно значительно выше по сравнению с сплавами Инколой, что обеспечивает улучшенную производительность при высоких температурах, где они сохраняют большую часть своей прочности. Однако из-за этого повышенного содержания никеля по сравнению с сплавами Инколой, они обычно более дорогие. В семействе Инконель существует до двадцати разных марок, самыми распространенными из которых являются Инконель 600 и Инконель 718 [3]. В таблице 1 показан химический состав трех различных типов сплавов.

Табл. 1. Состав сплавов на основе никеля (% мас)

Элементы	Инколой 825	Инконель 600	Инконель 718
Ni	40,99	72,7	52,8
Cu	1,648	0,025	-
Cr	23,09	16,5	19,0

Табл. 1. Продолжение

Элементы	Инколой 825	Инконель 600	Инконель 718
Fe	28,49	9,46	18,5
Si	0,123	0,292	-
C	0,017	0,072	-
S	0,037	0,001	-
Mn	0,372	0,233	-
Mo	3,107	-	3,0
Al	0,095	-	0,5
Ti	0,874	-	0,09
Nb	-	-	5,1

В таблице 2 приведены основные механические свойства сплавов на основе никеля.

Табл. 2. Свойства сплавов на основе никеля

Параметры	Инколой 825	Инконель 600	Инконель 718
Плотность, г/см <sup>3</sup>	8,14	8,47	8,19
Предел прочности при растяжении, МПа	690	655	1350
Предел текучести, МПа	310	310	1100
Модуль упругости, ГПа	196	200	208
Относительное удлинение при разрыве, %	65	40	25
Твердость по Виккерсу	199	140-320	250-280
Коэффициент Пуассона	0,29	0,31	0,29
Теплопроводность, Вт/м·с	7,9	14,9	11,4
Температура плавления, °С	1370-1400	1354-1413	1260-1336

### Сварка сплавов на основе никеля

Применение элементов и деталей из металлов всегда вызывает вопросы их соединения и одним из способов создания неразъемных соединений металлов и сплавов является сварка. Никелевые сплавы успешно свариваются при соблюдении технологии.

Для сварки никелевых сплавов подходят основные способы дуговой сварки: плавящимся покрытым электродом (SMAW); плавящимся электродом в защитном газе (GMAW) и неплавящимся вольфрамовым электродом в защитном газе (GTAW). Помимо этих, используются и другие процессы сварки, такие как: дуговая сварка под флюсом (SAW), лазерная (LBW) и электронно-лучевая сварка (EBW). При выборе параметров сварки для любой из выбранных технологий важным параметром является количество тепловложения, от которого зависит один из основных возможных дефектов – образование трещин.

Сварное соединение должно соответствовать свойствам основного металла, чтобы обеспечить безопасную и надежную работу компонента. Хотя у никеля и его сплавов есть определенные проблемы свариваемости, их можно успешно сваривать [4].

Основная проблема свариваемости никелевых сплавов заключается в склонности образования горячих трещин кристаллизации, которые могут даже появляться в поперечном направлении. Кроме этого, никель и его сплавы проявляют большую склонность к образованию пор вследствие хорошей растворимости в расплавленном металле азота, водорода, кислорода и резкого снижения растворимости при затвердевании металла. Легирование шва Ti, Cr и V уменьшает пористость, а легирование Mn, C, Si, Fe увеличивает. При аргонодуговой сварке вероятность образования пор уменьшается с повышением качества защиты зоны сварки.

Некоторые сплавы Ni, особенно с Cr и Mo, проявляют склонность к межкристаллитной коррозии, для предотвращения которой сварное соединение подвергают отжигу. Сваривать такие сплавы газовой сваркой нежелательно, так как длительное воздействие высокой температуры может привести к понижению коррозионной стойкости [5].

При сварке никеля и его сплавов для улучшения свариваемости приходится вводить в зону сварки легирующие компоненты, поэтому химический состав сварного шва отличается от основного металла. И в этом случае повышается опасность выпадения интерметаллидов на границах зерен.

Чаще всего основной причиной всех трех основных дефектов сварного шва никелевых сплавов является рост зерна кристаллизующегося материала при сварке. При этом рост зерна способствует нахождение металла в зоне высоких температур длительное время. Учитывая технику тепловложения энергии при сварке можно выделить две основные причины роста зерна – это увеличение вводимой погонной энергии и низкий теплоотвод от места сварки. Проблему свариваемости никелевых сплавов и основные причины, к этому приводящие показаны на рисунке 1 в виде графоаналитического способа построения «дерева проблем» [6]. На рисунке 1 показаны также основные базовые события, которые может регулировать непосредственно сварщик в процессе выполнения сварного шва. Низкая скорость сварки и завышенный ток приводят к увеличению погонной энергии, а отсутствие принудительного охлаждения зоны сварки и использование только естественного охлаждения на воздухе приводит к тому, что сварной шов находится в зоне высоких температур достаточно долго. Также увеличению времени пребывания в зоне высоких температур способствует сварка в широкую разделку, поскольку от этого увеличивается общая длина сварного валика, а значит и общее время выполнения сварки. Поэтому рекомендуется сварку сплавов на никелевой основе выполнять узкими валиками ограниченного компактного сечения, без поперечных колебаний электрода, с возможно большей скоростью.



Рис. 1. Основные причины проблем качественной сварки никелевых сплавов

Необходимость принудительного охлаждения также связана с низкой теплопроводностью сплавов, о которой говорилось в таблице 2. Но также росту зерна способствует еще и параметр низкой вязкости расплавленного никеля, вызывающий сложности при формировании сварочной ванны и вынуждающий сварщика более длительное время воздействовать электрической дугой на свариваемые элементы [7].

Никелевые сплавы требовательны к аккуратности и чистоте выполнения сварочных работ. Выше чем для сталей вероятность образования трещин в углублениях, поэтому рекомендуется шлифовка начальных и конечных точек сварки. Важным аспектом для получения прочных сварных соединений является чистота зоны сварного шва, поэтому любые загрязнения маслом, ржавчиной, оловом, серой и другими элементами с низкой температурой плавления могут привести к трещинам. Поэтому при сварке Ni и его сплавов

необходима тщательная зачистка кромок и прилегающих к ним участков на ширине 20-25 мм механическим путем с последующим обезжириванием, так как на них образуется налет.

Металл в сварочной ванне при сварке никеля и его сплавов более вязок, чем при сварке сталей, и поэтому проплавляется на меньшую глубину, что требует значительной разделки кромок и увеличения их притупления. Нагревание никелевых сплавов перед сваркой («предварительный подогрев») обычно не требуется, кроме случаев необходимости дополнительного нагрева для повышения его температуры выше точки замерзания или для предотвращения конденсации влаги, которая может возникнуть, например, если сплав был доставлен в теплый цех из холодного места хранения [8].

Нахождение расплавленного металла в зоне высоких температур определяется организацией теплоотвода, при этом есть рекомендации по допустимой температуре места сварки перед началом следующего слоя сварного шва. Допустимой температурой металла между проходами считается температура не выше 150-175°C, хотя некоторые производители цветных металлов рекомендуют допустимую температуру не выше 100°C.

Таким образом, знание особенностей поведения никелевых сплавов при сварке, позволяет сформулировать рекомендации по организации этого процесса [5]:

- выполнять проверку технологических карт по сварке никелевых сплавов, не допуская халатности к их составлению и не допуская их некорректности или неточности;
- допускать к сварке никелевых сплавов только сварщиков с высокой квалификацией и не допускающих халатного отношения к процессу;
- обеспечивать ознакомление сварщиков с технологическими картами до начала процесса сварки;
- выполнять пооперационный контроль выполнения сварного шва;
- выполнять контроль температуры металла между проходами;
- обеспечивать исправность термометра (термопары) во время контроля температуры металла.

### **Выводы**

Никель и никелевые сплавы обладают рядом уникальных свойств, которые делают этот сплав очень привлекательным в применении в различных отраслях промышленности. Свойства никеля позволяют создавать на его основе так называемые суперсплавы, которые способны без снижения прочностных характеристик длительное время работать под нагрузкой в агрессивных средах при температурах близких к температурам плавления. Никелевые сплавы обладают неплохой свариваемостью, но при этом сохранение свойств сплава в сварных швах сложная задача из-за возникающих дефектов. Причины возникновения дефектов в большинстве случаев можно объединить в две группы: неаккуратность и нарушение технологического режима. Вопросы неаккуратности связаны с халатностью сварщика, который некачественно подготовил кромки или допустил попадание в зону сварки посторонних включений. Такие проблемы должны быть исправлены повышением культуры труда. А вопросы нарушений технологического режима более сложные и требуют более детального подхода. Это не только подробное указание особенностей процесса в технологической карте. Это и совершенствование самой технологии сварки [8-10], разработка методов принудительного охлаждения и других способов интенсификации процесса, улучшающих качество получаемого результата.

### **Список литературы**

1. Шаяхметова Э.Р., Мухаметгалина А.А., Мурзинова М.А., Назаров А.А. Прочность соединений никеля, полученных ультразвуковой сваркой по разным режимам // Физика и технология перспективных материалов – 2023: Сборник трудов Международной конференции, Уфа, 02-06 октября 2023 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2023. – С. 399-400.
2. Люшинский А.В. Получение высокоактивного УДП никеля и его применение при диффузионной сварке разнородных материалов // Быстрозакаленные материалы и покрытия: Материалы XIX Международной научно-технической конференции, Москва, 18-19 октября 2022 года. – М.: Изд-во Пробел-2000, 2022. – С. 269-270.

3. Галиева Э.В. Твердофазная сварка жаропрочных сплавов на основе никеля // Сварка и контроль: Сборник статей. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – С. 55-57.
4. Медведев А.Ю., Никифоров Р.В., Галимов В.Р., Муругова О.В., Савичев М.П., Большаков Б.О. Особенности формирования микроструктуры околошовной зоны при роботизированной сварке гетерогенного сплава на основе никеля // Materials. Technologies. Design. – 2021. – Т. 3, № 1(3). – С. 40-47.
5. Закиров Р.Р., Мансуров И.Р. Разработка технологии сварки трубопроводов из железоникелевых и никелевых сплавов // Сварка и контроль: Сборник статей. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – С. 82-85.
6. Бадертдинов Д.Д., Туманова Е.Ю. Анализ причин дефектов сварного шва, выполненного роботизированным устройством // Актуальные проблемы науки и техники – 2023: XVI Международная научно-практическая конференция молодых ученых, Уфа, 27-31 марта 2023 года. Том 1. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2023. – С. 175-177.
7. Файрушин А.М. Совершенствование технологического процесса изготовления корпусов аппаратов с применением вибрационной обработки: дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2003. – 121 с.
8. Патент № 2424885 РФ. Способ снижения остаточных напряжений в сварных соединениях металлов / А.М. Файрушин, Д.В. Каретников, М.З. Зарипов, Т.З. Абдуллин, Р.М. Ахтямов, М.Р. Фазылов. – Заявка №2009149108/02 от 28.12.2009; опубл. 27.07.2011.
9. Хафизова О.Ф., Болобов В.И., Файрушин А.М., Кузькин А.Ю. К влиянию вибрационной обработки на механические свойства разнородных сварных соединений // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2011. – № 1. – С. 210-219.
10. Колесников Я.А., Ризванов Р.Г., Файрушин А.М. Влияние направления приложения вибрационного воздействия в процессе сварки на поле остаточных напряжений в стыковом сварном соединении // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2006. – № 2. – С. 80.

#### References

1. Shayakhmetova E.R., Mukhametgalina A.A., Murzinova M.A., Nazarov A.A. Strength of nickel compounds obtained by ultrasonic welding according to different modes // Physics and technology of advanced materials – 2023: Proceedings of the International Conference, Ufa, October 02-06, 2023. – Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2023. – P. 399-400.
2. Lyushinsky A.V. Obtaining highly active UDP nickel and its application in diffusion welding of heterogeneous materials // Quick-hardened materials and coatings: Materials of the XIX International Scientific and Technical Conference, Moscow, October 18-19, 2022. – M.: Space Publishing House-2000, 2022. – P. 269-270.
3. Galieva E.V. Solid-phase welding of heat-resistant nickel-based alloys // Welding and control: Collection of articles. – Ufa: Ufa State Petroleum Technical University, 2022. – P. 55-57.
4. Medvedev A.Yu., Nikiforov R.V., Galimov V.R., Murugova O.V., Savichev M.P., Bolshakov B.O. Features of the formation of the microstructure of the near-seam zone during robotic welding of a heterogeneous nickel-based alloy // Materials. Technologies. Design. 2021, vol. 3, no. 1(3), pp. 40-47.
5. Zakirov R.R., Mansurov I.R. Development of technology for welding pipelines from iron-nickel and nickel alloys // Welding and control: Collection of articles. – Ufa: Ufa State Petroleum Technical University, 2022. – P. 82-85.
6. Badertdinov D.D., Tumanova E.Yu. Analysis of the causes of defects in a weld made by a robotic device // Actual problems of Science and Technology – 2023: XVI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Ufa, March 27-31, 2023. Vol. 1. – Ufa: Publ. house "Oil and Gas business", 2023. – P. 175-177.
7. Fayrushin A.M. Improvement of the technological process of manufacturing apparatus housings using vibration treatment: diss. ... cand. of tech. sc. – Ufa, 2003. – 121 p.
8. Patent No. 2424885 RU. Method for reducing residual stresses in welded metal joints / A.M. Fayrushin, D.V. Karetnikov, M.Z. Zaripov, T.Z. Abdullin, R.M. Akhtyamov, M.R. Fazylov. – Appl. No. 2009149108/02 from 28.12.2009; publ. 27.07.2011.
9. Khafizova O.F., Bolobov V.I., Fayrushin A.M., Kuzkin A.Yu. On the influence of vibration treatment on the mechanical properties of heterogeneous welded joints // Electronic scientific journal Oil and Gas business. 2011, no. 1, pp. 210-219.
10. Kolesnikov Ya.A., Rizvanov R.G., Fayrushin A.M. Influence of the direction of application of vibration effects in the welding process on the field of residual stresses in a butt weld joint // Electronic scientific journal Oil and Gas business. 2006, no. 2, p. 80.

#### Сведения об авторах:

#### Information about authors:

<b>Айсахрам Хамзех Халед Мохаммад</b> – аспирант	<b>Ayasrah Hamzeh Khaled Mohammad</b> – postgraduate student
<b>Туманова Елена Юрьевна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварки и контроля» otsk@rusoil.net	<b>Tumanova Elena Yuryevna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department «Equipment and technologies of welding and control»

Получена 11.04.2024