



УДК 539.3,620.193

## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛИ AISI 316<sup>5)</sup>

\*М.М. Абрамова, \*М.В. Караваева, \*\*М.Ю. Смолякова, \*И.В. Александров

\*Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет,  
ул. К.Маркса, 12, Республика Башкортостан, Уфа, 450000, Россия, e-mail: [abramovamm@yandex.ru](mailto:abramovamm@yandex.ru)

\*\*НОиИЦ «Наноструктурные материалы и нанотехнологии»,  
ул. Королева, 2а, Белгород, 308034, Россия, e-mail: [SmolaykovaMarina@mail.ru](mailto:SmolaykovaMarina@mail.ru)

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования влияния интенсивной пластической деформации на микроструктуру, а также на электрохимическое поведение нержавеющей стали. Интенсивная пластическая деформация осуществлялась методом равноканального углового прессования с различным числом проходов. Методами просвечивающей электронной микроскопии и методом дифракции отраженных электронов проведены исследования микроструктуры после деформации. Проведены испытания на межкристаллитную коррозию в различных структурных состояниях.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, нержавеющая сталь, коррозионная стойкость, субмикроструктурная структура.

**1. Введение.** Среди многочисленных коррозионностойких сталей и сплавов наибольшее применение в различных отраслях промышленности нашли хромоникелиевые стали и их модификации. Эти стали широко применяются как в химической и нефтехимической отраслях, так и в атомной энергетике, авиа- и судостроении и т.д. Хромоникелевые стали отвечают самым высоким и разнообразным требованиям [1–4]. Стоит отметить, что в последнее десятилетие возрос интерес к материалам, полученным методами интенсивной пластической деформации [5]. Это можно объяснить тем фактом, что благодаря указанным методам обработки удастся существенно повысить такие характеристики материала, как прочность, износостойкость и прочее [6–8]. Однако, структурные изменения, приводящие к повышению прочностных характеристик, могут существенно изменить коррозионное поведение материала. Особенно актуален этот вопрос применительно к коррозионностойким материалам, работающим в агрессивных средах. Так измельчение структуры нержавеющей сталей в процессе интенсивной пластической деформации (ИПД) может неоднозначно сказаться на склонности материала к межкристаллитной коррозии. Данный вид коррозии является одним из самых опасных из-за сложности диагностирования.

<sup>5)</sup>Исследование выполнено при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» грант 14.А18.21.2059



В связи с этим целью представляемой работы являлось исследование склонности к межкристаллитной коррозии нержавеющей стали AISI 316L после ИПД с различной степенью деформации в объеме материала.

**2. Материалы и методики.** В качестве материала исследования была выбрана нержавеющая сталь AISI 316L в виде прутка диаметром 10мм, стандартного химического состава (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав стали AISI 316L, ат.

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Ti	Mo
AISI 316L	0.03	1.72	0.045	0.030	0.41	17.00	12.90	0.50	2.36

С целью снятия внутренних напряжений и получения однородного состояния по всему объему образца была проведена закалка в аустенитной области с температуры 1050° в воду, с предварительной выдержкой в течении часа.

В качестве метода ИПД использовалось равноканальное угловое прессование (РКУП). Образцы длиной 60мм подвергали деформации при температуре 500° с различным числом проходов: 1, 2, 4, 8 и 12, при этом угол между каналами составлял 120°.

Металлографические исследования структуры образцов в начальном состоянии и после деформации были выполнены с использованием оптического микроскопа Olympus GX 71, растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM – 6390 и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JOEL JEM 2100 при ускоряющей разности потенциалов 200кВ. Оценка склонности материала к межкристаллитной коррозии проводили методом потенциодинамической реактивации в водном растворе серной кислоты и роданистого калия [9]. Испытания проводили с использованием потенциостата IPC-Pro и стандартной трехэлектродной ячейки. В качестве электрода сравнения был взят хлор-серебряный электрод, а в роли вспомогательного электрода выступал углеродный. Перед началом поляризации все образцы выдерживали в электролите в течение 1 часа. После установления стационарного потенциала на образце начинали поляризацию в положительную (анодную) сторону со скоростью развертки 3 мВ/с. При этом, на границе металл-электролит формируется оксидная пленка, препятствующая растворению металла. В результате, скорость растворения металла резко снижается. Стоит отметить, что если пассивирующая пленка не будет сплошной по всей поверхности образца, материал начнет подвергаться коррозии. Анализ стабильности формируемой пассивирующей пленки на поверхности исследуемой стали проводить по регистрируемому пику реактивации ( $I_p$ ). При наличии стабильного состояния пассивирующей пленки, возможна регистрация малых значений тока, иногда отрицательных. Оценка склонности материала проводить по значению коэффициента реактивации, определяемый как отношение площади пика пассивации к площади пика реактивации. Коэффициент реактивации позволяет сделать заключение о склонности к МКРПН и МКК аустенитных коррозионно-стойких сталей и изготовленного из них оборудования. Так для коррозионно стойких сталей коэффициент реактивации должен быть меньше 0,11.



**3. Эксперимент.** Микроструктура стали после закалки представляла собой равноосные зерна аустенита со средним размером зерна 25 мкм (рис. 1). РКУП привело к сильному уменьшению размеров структурных элементов.

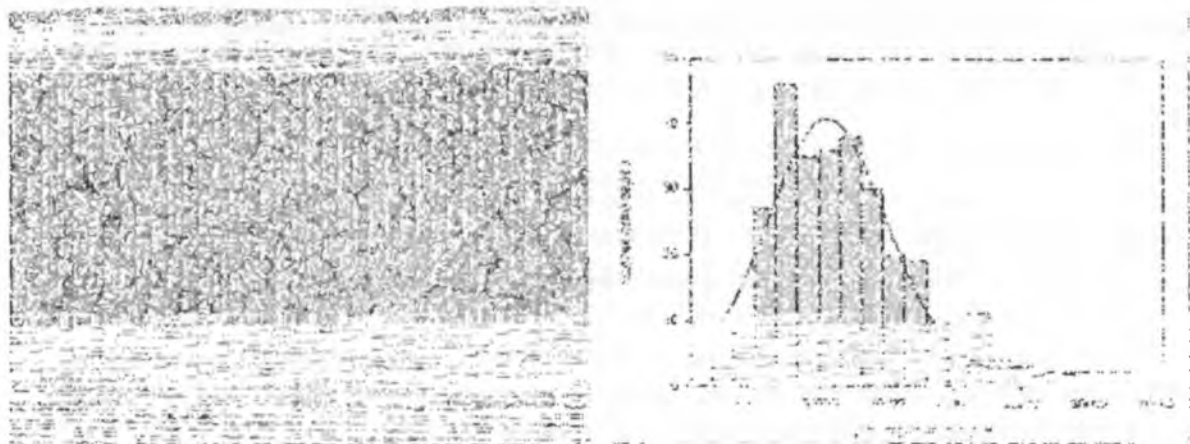


Рис. 1. Микроструктура и средний размер зерна в стали 316L после закалки.

После одного прохода РКУП в осевом сечении наблюдается металлографическая текстура. В структуре присутствуют зерна, соизмеримые по размеру с исходным состоянием и зерна меньшего размера. При этом доля малоугловых границ зерен значительно увеличивается по сравнению с исходным состоянием, для которого характерны высокоугловые границы зерен. В тонкой структуре (рис. 3) видны субзерна различной формы, размеров и взаимного расположения: наряду с равноосными фрагментами, размер которых составляет  $520 \pm 30$  нм, наблюдаются удлиненные фрагменты на темнопольном изображении. Внутреннее строение кристаллов характеризуется высокой плотностью дислокаций.

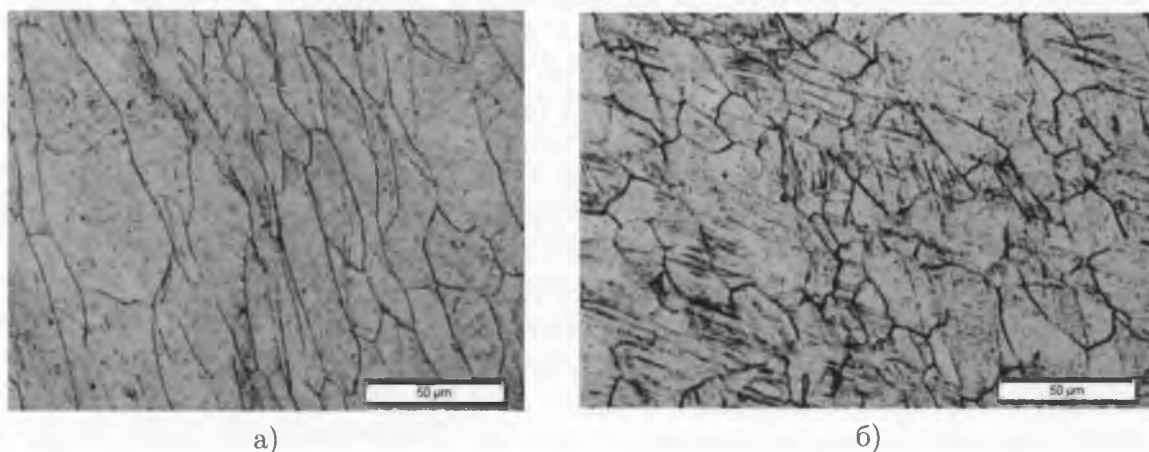


Рис. 2. Микроструктура стали AISI 316. Продольное сечение: а) - после одного прохода, б) - после двух проходов РКУП.

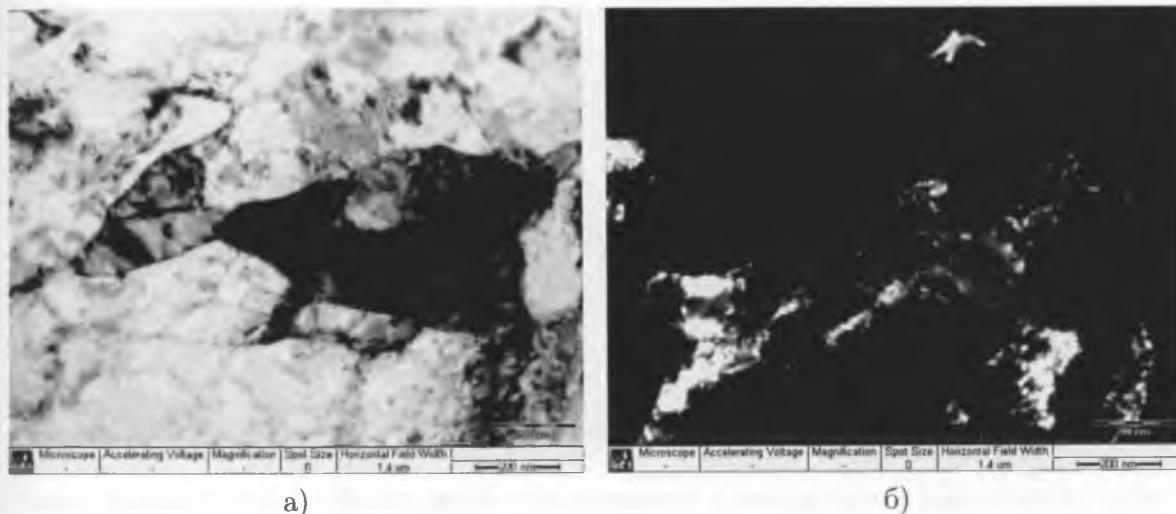


Рис. 3. Микроструктура стали AISI 316. Продольное сечение: а) – светлопольное изображение, б) – темнопольное изображение.

После двух проходов РКУП вытянутость зерен менее заметна, чем после одного прохода (рис. 2б). Наблюдаются деформационные полосы, пересекающие весь образец, которые видны и после четырех проходов. Доля малоугловых границ превышает долю высокоугловых. После четырех проходов РКУП (рис. 4) структура более однородна. ПЭМ наблюдения указывают на формирование смешанной фрагментированной структуры. Средний размер фрагментов составляет  $263 \pm 40$  нм.

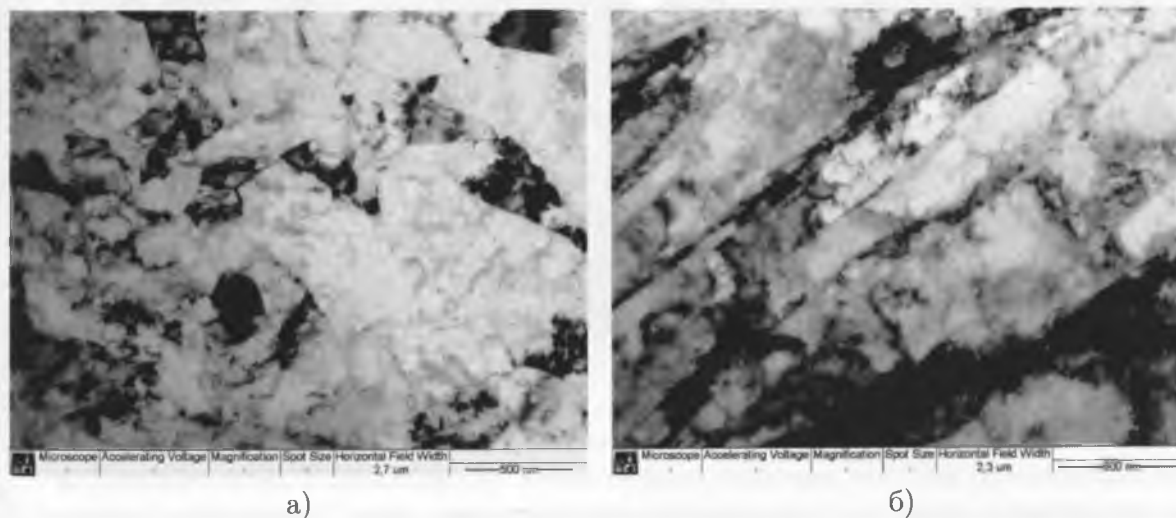


Рис. 4. Тонкая структура стали после четырех проходов РКУП в продольном сечении.

Размер фрагментов после восьми проходов РКУП составляет  $202 \pm 32$  нм (рис. 5). Доля малоугловых границ превышает долю высокоугловых, но в отличие от предыдущего состояния, доля высокоугловых границ намного больше.

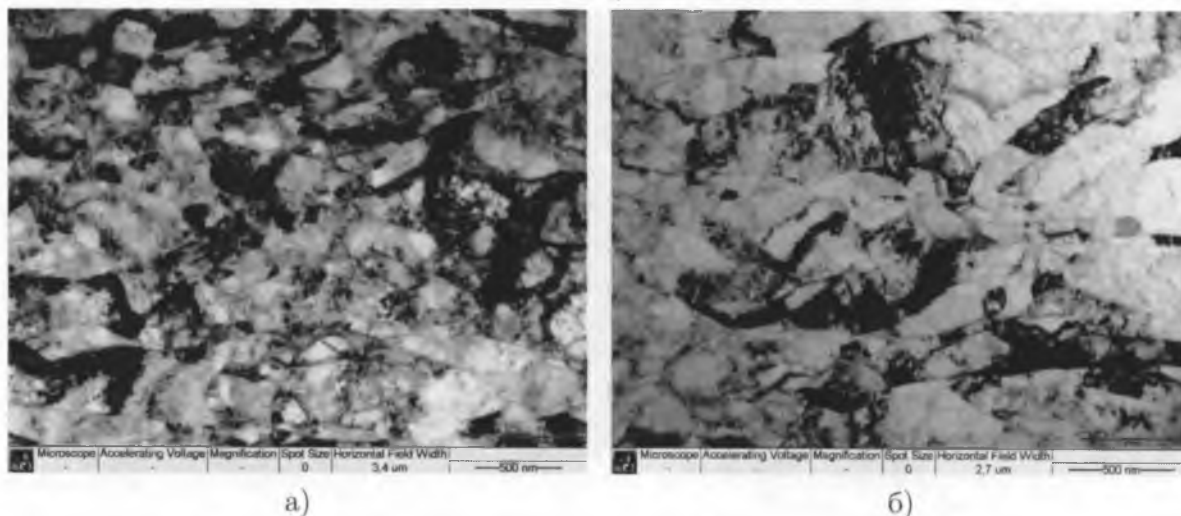


Рис. 5. Тонкая структура стали после восьми проходов РКУП в продольном сечении.

После двенадцати проходов РКУП происходит дальнейшее измельчение структуры. Средний размер равноосных фрагментов в этом состоянии составляет  $152 \pm 24$  нм. В микроструктуре практически отсутствуют удлиненные фрагменты (рис. 6). Доля высокоугловых границ повышается по сравнению с предыдущим состоянием.

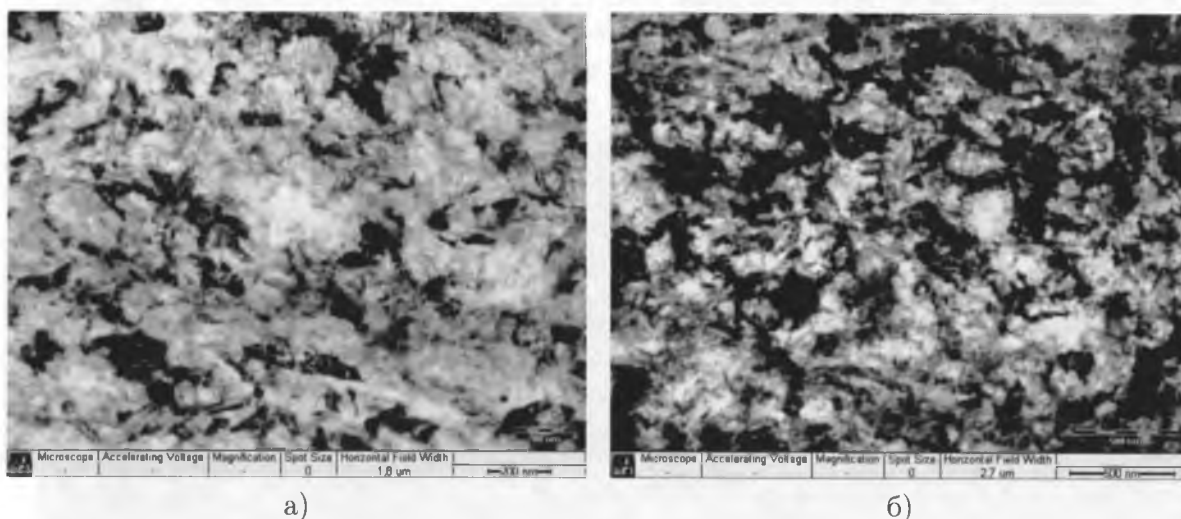


Рис. 6. Тонкая структура стали после двенадцати проходов РКУП в продольном сечении.

Исследования стойкости к межкристаллитной коррозии (рис. 7) показали, что наиболее коррозионно стойкое состояние соответствует состоянию после 4 проходов (табл. 2). Во всех состояниях кривая реактивации не имеет четко выраженного пика реактивации (рис. 7). Таким образом, склонность к межкристаллитной коррозии стали после деформации уменьшается. Скорее всего, это вызвано структурными изменениями в материале.



Таблица 2

Значение стационарного потенциала и коэффициента реактивации

Состояние	Исходное	РКУП (2 прохода)	РКУП (4 прохода)	РКУП (8 проходов)	РКУП (12 проходов)
$U, mV$	-390	-423	-380	-408	-399
$K = I/I_p$	0.115	0.127	0.007	0.021	0.015

Так на первом этапе при увеличении числа проходов происходит разрушение большеугольных границ, то формируется сетка малоугольных границ зерен, в результате чего потенциал поверхности выравнивается и повышается коррозионная стойкость к межкристаллитной коррозии, что также видно по значениям коэффициента реактивации (табл. 2). С увеличением количества проходов до восьми, происходит формирование новых высокоугольных границ зерен, что приводит к снижению коррозионной стойкости. Однако значения коэффициента реактивации меньше, чем для стали в исходном состоянии – в состоянии закалки.

Поляризационные кривые

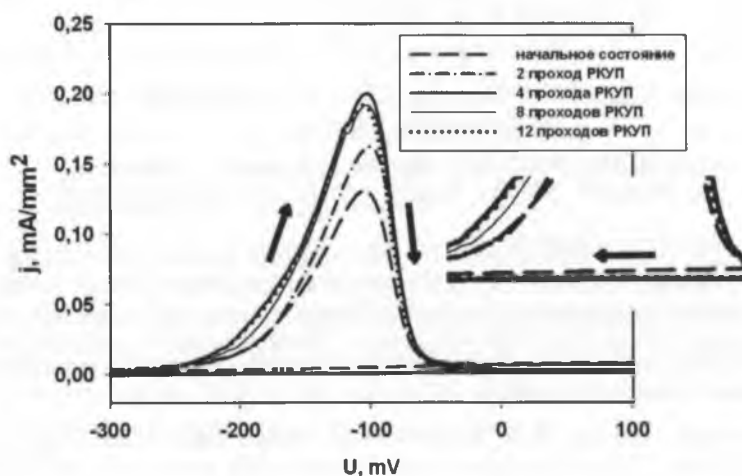


Рис. 7. Поляризационные кривые в катодном и анодном направлении в исследуемых состояниях.

**4. Заключение.** Таким образом, в работе было показано, что при равноканальном угловом прессовании с увеличением степени деформации происходит постепенное измельчение структуры и в итоге формируется субмикроструктурная структура. При этом измельчение структуры не приводит к снижению склонности стали к межкристаллитной коррозии. Наиболее коррозионностойкое состояние соответствует 4 проходам РКУП.



### Литература

1. Бабаков А.А., Приданцев М.В. Коррозионные стали и сплавы / М.: Машиностроение, 1971. – 320 с.
2. Бугай Д.Е. Коррозионные стали и сплавы / Учеб. Пособие / Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. – 72 с.
3. Маттссон Э. Электрохимическая коррозия / Пер. со шведск.: Под ред. Я.М. Колотыркина / М.: Metallurgia, 1991. – 158 с.
4. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали / М.: Metallurgizdat, 1993. – 600 с.
5. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / М.: Логос, 2000. – 272 с.
6. Добаткин С.В., Арсенкин А.М., Попов М.А. и др. Получение объемных нано- и субмикроструктурных материалов методом интенсивной пластической деформации // МиТОМ. – 2005. – №5. – С.29-34.
7. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. // Progress in Material Science. – 2000. – 45;2. – P.102-189.
8. Dobatkin S., Zrnik J., Mamuzik I. Ultrafine-grained low carbon steel by severe plastic deformation // Metallurgija. – 2008. – 47;3. – h.181-186.
9. ГОСТ 9.914 — 91 Единая система защиты от коррозии и старения. Стали коррозионностойкие аустенитные. Электрохимические методы определения стойкости против межкристаллитной коррозии.

#### EFFECT OF EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING DEGREE ON MICROSTRUCTURE AND CORROSION BEHAVIOR OF STAINLESS STEEL AISI 316L

\*M.M. Abramova, \*\*M.Yu. Smolyakova, \*M.V. Karavava, \*I.V. Alexandrov

\*Ufa State Aviation Technical University, K.Marx St., 12, Ufa, Bashkortostan, 450000, Russia, e-mail: [abramovamm@yandex.ru](mailto:abramovamm@yandex.ru)

\*\*Centre of nanostructural materials and nanotechnologies,  
Koroleva St., 2a, Belgorod, 308034, Russia, e-mail: [SmolaykovaMarina@mail.ru](mailto:SmolaykovaMarina@mail.ru)

**Abstract.** Investigation results concerned the effect of severe plastic deformation on the microstructure and the electrochemical behavior of stainless steel are presented. Severe plastic deformation is performed by equal channel angular pressing with different number of passes. The microstructure after deformation has been investigated with the help of the transmission electron microscopy and the electron backscatter diffraction. Research has also been conducted on intergranular corrosion in different structural states of stainless steel.

**Key words:** severe plastic deformation, stainless steel, submicrocrystalline structure, corrosion resistance.