

- сложных поверхностей // Вестник машиностроения. 2003. № 5. с. 61.
7. Петухов Ю.Е. Проектирование инструментов для обработки резанием деталей с фасонной винтовой поверхностью на стадии технологической подготовки производства. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Москва, 2004.
 8. Петухов Ю.Е., Водовозов А.А. Математическая модель криволинейной режущей кромки спирального сверла повышенной стойкости // Вестник МГТУ Станкин. 2012. № 3. с. 28-32.
 9. Родин П.Р. Геометрия режущей части спирального сверла. – К.: Техніка, 1971. – 136 с.
 10. Романов В.Б. Повышение точности производящего профиля зуборезных долбяков.
 11. Султанов Т.А., Артюхин Л.Л. Кинетопластика // СТИН. 2004. № 8. с. 31.

Исследование статистических связей механических свойств с химическим составом прутков и листов из титановых сплавов

к.т.н. доц. Давыденко Л.В.

Университет машиностроения

8 (495) 223-05-23, доб. 15-51, mati-davidenko@mail.ru

д.т.н. проф. Егорова Ю.Б., к.т.н. доц. Мамонов И.М., Чибисова Е.В.

МАТИ – РГТУ имени К.Э. Циолковского

egorova_mati@mail.ru

Аннотация. На основе статистического анализа опубликованных данных по механическим свойствам установлены корреляционные связи предела прочности, относительного удлинения, поперечного сужения с химическим составом титановых сплавов разных классов.

Ключевые слова: титановые сплавы, механические свойства, химический состав

К настоящему времени в мире исследовано несколько сот опытных титановых сплавов и разработано более сотни промышленных композиций [1, 2]. В связи с этим целесообразно провести статистическое обобщение их состава, механических и технологических свойств. Несмотря на большое число опубликованных материалов (статей, монографий, сборников трудов конференций и т.п.), в них не всегда указан точный химический состав исследованных сплавов. В ранее проведенных нами исследованиях [3-6 и др.] в качестве исходных данных для статистического анализа был использован средний химический состав сплавов по нормативной документации и типичные механические свойства (предел прочности и относительное удлинение) отожженных прутков диаметром 8-12 мм [1, 2]. Для оценки прочностных и пластических свойств прутков в зависимости от содержания легирующих элементов и примесей были использованы понятия о структурных и прочностных эквивалентах легирующих элементов и примесей по алюминию и молибдену [1]. Совместное влияние β -стабилизирующих элементов на структуру и прочность сплавов можно оценить с помощью структурного и прочностного эквивалентов по молибдену, а влияние α -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей - с помощью структурного и прочностного эквивалентов по алюминию [1]:

$$[Al]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = \%Al + \%Sn/3 + \%Zr/6 + 10[\%O + \%C + 2\%N] \quad (1)$$

$$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{cmp}} = \%Mo + \%Ta/4,5 + \%Nb/3,3 + \%W/2 + \%V/1,4 + \%Cr/0,6 + \%Mn/0,6 + \%Fe/0,4 + \%Ni/0,8, \quad (2)$$

$$[Al]_{\text{экв}}^{\text{np}} = \%Al + \%Sn/2 + \%Zr/3 + 3,3\%Si + 20\%O + 33\%N + 12\%C, \quad (3)$$

$$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{np}} = \%Mo + \%V/1,7 + \%Mn + \%W + \%Cr/0,8 + \%Fe/0,7 + \%Nb/3,3. \quad (4)$$

В монографии [2] для расчета уровня прочности отожженных прутков (диаметром 8-12

мм) α -, псевдо α - и $\alpha+\beta$ -титановых сплавов было предложено использовать прочностные эквиваленты по алюминию и молибдену:

$$\sigma_B^{расч} = 235 + 60[Al]_{экв}^{np} + 50[Mo]_{экв}^{np} \quad (5)$$

где: $\sigma_0=235$ МПа соответствует временному сопротивлению разрыву чистого титана.

В наших работах [3-6] для оценки относительного удлинения прутков диаметром 8-12 мм в зависимости от прочностных эквивалентов для α -, псевдо α - и $\alpha+\beta$ -сплавов титановых сплавов с $[Al]_{экв}^{np} \approx 3-14\%$ и $[Mo]_{экв}^{np} \approx 0-6\%$ было получено соотношение:

$$\delta = 27,6 - 1,1[Al]_{экв}^{np} - 0,92[Mo]_{экв}^{np} \quad (6)$$

Для отечественных и зарубежных титановых сплавов всех классов (α , псевдо α , $\alpha+\beta$, псевдо β) регрессионная зависимость относительного удлинения прутков 8-12 мм от предела прочности титановых сплавов имеет вид [3]:

$$\delta = 57,3 - 0,078\sigma_g + 3,3 \cdot 10^{-5} \sigma_g^2. \quad (7)$$

Однако для практических целей более удобна линейная модель, которая была получена для оценки относительного удлинения отечественных сплавов (при $\sigma_g=400-1200$ МПа) [6]:

$$\delta = 36 - 0,02\sigma_g. \quad (8)$$

Цель настоящей работы состояла в установлении статистических зависимостей механических свойств кованных прутков диаметром 12-65 мм и листов толщиной 1,5-8,0 мм от конкретного (а не среднего по ГОСТ) химического состава титановых сплавов (в отожженном состоянии). Для этого были обобщены и статистически обработаны только те литературные данные, в которых был указан конкретный состав сплава, вид полуфабриката (прутки и листы), его габариты (диаметр или толщина), направление вырезки образцов, конкретные режимы отжига и механические свойства. В качестве литературных источников в основном были использованы результаты исследований, проведенные в ВИАМе и опубликованные в сборниках статей и монографиях [7-13]. Всего было исследовано 174 композиции химического состава отечественных промышленных и модельных сплавов, из них для прутков – 113, листов – 61. Для исследованных сплавов структурный эквивалент по алюминию изменяется от 1,5 до 12%, по молибдену – от 0 до 24% (для прутков) и до 33% (для листов); прочностной эквивалент по алюминию – от 3,8% до 13,5 %, по молибдену – от 0 до 10% (для прутков) и до 6% (для листов). Предел прочности прутков и листов из исследованных сплавов (после полного отжига) лежит в интервале 385-1520 МПа и 378-1330 МПа соответственно, относительное удлинение – 3,0-44,0 % и 8,0-40,0%, поперечное сужение – 19,0-80,0% и 22,0-70,0%; ударная вязкость – 0,23-2,63 МДж/м² и 0,14-2,0 МДж/м².

Статистический анализ проводили в программе «Stadia 8.0» [14]. Исследуемыми факторами были структурные и прочностные эквиваленты легирующих элементов и примесей по алюминию и молибдену, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение, поперечное сужение, ударная вязкость, диаметр прутка, толщина листа.

На первом этапе статистической обработки были проанализированы корреляционные зависимости механических свойств от диаметра прутков и от толщины листа. Для этого были рассчитаны коэффициенты частной корреляции. Увеличение диаметра кованных прутков с 12,0 до 65,0 мм и толщины листов с 1,5 до 3,0 мм статистически не влияет на уровень механических свойств сплавов, так как коэффициенты корреляции близки к нулю. Для листов толщиной 1,5-8,0 мм значения коэффициентов корреляции $r=-0,5 \div -0,55$ свидетельствует о том, что увеличение толщины листа сопровождается некоторым снижением уровня механических свойств сплавов. Результаты корреляционно-регрессионного анализа зависимости механических свойств от различных факторов приведены в таблице 1.

При анализе влияния прочностных эквивалентов из статистического массива были исключены псевдо β - и β -сплавы, так как для них эффект растворного упрочнения ослабляется с увеличением содержания легирующих элементов, и прямолинейный закон упрочнения сменяется на параболический, так что при большом содержании легирующих элементов способность сплавов к растворному упрочнению исчерпывается и формулы (3) и (4) для расчета

прочностных эквивалентов становятся неприемлемыми.

Таблица 1

Результаты регрессионного анализа зависимости механических свойств прутков диаметром 12-65 мм из титановых сплавов от различных факторов (после простого отжига)

№	Регрессионная модель	R	R ²	S
1	$\sigma_s = 235 + 127 \cdot [Al]_{экв}^{cmp} + 32[Mo]_{экв}^{cmp} - 4,8([Mo]_{экв}^{cmp})^2$	0,87	0,75	122
2	$\delta = 30 - 1,36 \cdot [Al]_{экв}^{cmp} - 1,482 \cdot [Mo]_{экв}^{cmp} + 0,045 \cdot ([Mo]_{экв}^{cmp})^2$	0,77	0,6	4,9
3	$\psi = 80 - 5,23 \cdot [Al]_{экв}^{cmp}$	0,76	0,6	11,7
4	$\sigma_s = 235 + 65 \cdot [Al]_{экв}^{pp} + 47 \cdot [Mo]_{экв}^{pp}$	0,9	0,83	100
5	$\delta = 30 - 1,1 \cdot [Al]_{экв}^{pp} - 0,93 \cdot [Mo]_{экв}^{pp}$	0,8	0,6	5,2
6	$\psi = 92 - 4,9 \cdot [Al]_{экв}^{pp}$	0,8	0,7	10,3
7	$\delta = 41 - 0,025\sigma_s$	0,65	0,42	7,3
8	$\psi = 90 - 0,046\sigma_s$	0,64	0,42	13,9

Примечания: R – коэффициент корреляции, R² – коэффициент детерминации, S – статистическая ошибка.

С повышением $[Al]_{экв}^{cmp}$ с 1,5 до 12% предел прочности прутков линейно повышается, а относительное удлинение снижается. В зависимости $[Mo]_{экв}^{cmp}$ предел прочности сначала повышается, достигает максимума при $[Mo]_{экв}^{cmp} = 8-12\%$, затем уменьшается. Наиболее высокие значения прочности ($\sigma_s = 1520$ МПа) и минимум пластичности ($\delta = 3,0\%$; $\psi = 1,0\%$) имеют прутки модельного комплексно легированного сплава состава Ti-5Al-3Sn-4Mo-6V-1Fe-0,3Si с $[Al]_{экв}^{cmp} = 8,8\%$ м. и $[Mo]_{экв}^{cmp} = 10,3\%$ м. Аналогичные данные были получены и для листов.

В настоящей работе было проведено статистическое сравнение регрессионной модели 4 (таблица) с соотношением (5), полученным на основе анализа другого массива данных, состоящего из 53 сплавов [1]. Сравнение регрессионных моделей для прутков и листов, полученных в настоящей работе, в наших работах [3-6 и др.] и в монографии [1] показало, что их статистические характеристики очень близки друг к другу. Таким образом, на основе статистического исследования различных массивов данных как для отечественных, так и для зарубежных сплавов было установлено, что предел прочности возрастает линейно с повышением структурного эквивалента по алюминию с 1 до 12%. В зависимости структурного эквивалента по молибдену наблюдается максимум прочности и минимум пластичности при $[Mo]_{экв}^{cmp} = 8-12\%$. Увеличение прочностного эквивалента по алюминию и молибдену на 1% приводит к повышению прочности кованых прутков в среднем на 60-65 МПа и на 45-50 МПа соответственно. При этом относительное удлинение снижается в среднем на 1,1 и 0,9%. Повышение предела прочности кованых прутков и листов на 100 МПа сопровождается снижением относительного удлинения в среднем на 2,0-2,5%, а поперечного сужения – 4,0-5,0%.

Разработанные модели позволяют прогнозировать механические свойства титановых сплавов в зависимости от эквивалентов или проводить выбор сплава с заданным уровнем механических свойств. Предложенные принципы оценки механических свойств можно использовать также для обоснования возможности замены дорогих легирующих элементов эквивалентными количествами более дешевых элементов в традиционных титановых сплавах.

Литература

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Materials Properties Handbook. Titanium Alloys / Ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. ASM International. The Material Information Society. 1994. – 1176 p.p.

3. Егорова Ю.Б., Егоров Е.Н., Давыденко Р.А. Связь физико-механических свойств и обрабатываемости резанием отечественных титановых сплавов с их химическим составом. // Автомобильная промышленность, 2011, №12, с. 30-33.
4. Егорова Ю.Б., Мамонов И.М., Егоров Е.Н. О связи механических свойств титановых сплавов с их химическим составом. Труды МАТИ, 2009, с.
5. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Давыденко Р.А. Корреляция пластических характеристик титановых сплавов с их химическим составом // Материаловедение, 2012 г., № 9, с.26-31.
6. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Давыденко Р.А., Чибисова Е.В. Статистическое сопоставление механических свойств титановых сплавов разных классов. 77 Международная научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», МГТУ «МАМИ», 27-28 марта 2012 г., с. 53-60.
7. Титан в промышленности/ Сборник статей под ред. С.Г.Глазунова, М.: Оборонгиз, 1961, 314 с.
8. Производство титановых сплавов. / Сборник статей, вып. 4, М.: ОНТИ, 1967, 264 с.
9. Титан для народного хозяйства. М.: Наука, 1976, 288 с.
10. Производство титановых сплавов. / Сборник статей, вып. 5, М.: ВИЛС, 1969, 300 с.
11. Структура и свойства титановых сплавов. / Сборник статей под ред. С.Г. Глазунова и А.И. Хорева. М.: ОНТИ, 1972, 198 с.
12. Применение титановых сплавов. / Сборник статей под ред. С.Г. Глазунова и А.И. Хорева: ОНТИ, 1970, 50 с.
13. Легирование и термическая обработка титановых сплавов. / Сборник статей под ред. А.Т. Туманова, С.Г. Глазунова, А.И. Хорева. М.: ОНТИ, 1977, 42 с.
14. Кулаичев А.П. Методы и средства анализа данных в среде Windows. Stadia 6.0 – М: Информатика и компьютеры, 1996. - 257 с.

Влияние параметров плазменной дуги и материала заготовки на структуру и свойства наплавленного сплава Stellite 190 W

к.т.н. доц. Жаткин С.С., к.т.н. проф. Паркин А.А., Минаков Е.А.
Самарский государственный технический университет «СамГТУ»
8 (846) 332-42-27, sergejat@mail.ru, laser@samgtu.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований по влиянию тока плазменной дуги, расстояния от среза сопла плазмотрона до поверхности заготовки, скорости наплавки и материала заготовки (стали 40X, 19XГНМА, X18H9T) на процесс формирования геометрических размеров зоны наплавки, структуры и свойств наплавленного Stellite 190W.

Ключевые слова: плазменная наплавка, плазмотрон, микроструктура

Введение

В настоящее время в технологии машиностроения используется широкий спектр воздействия и модифицирования материалов и изделий, такие как электрофизические методы обработки и физико-химические технологии [1-3, 5, 9] Среди них немаловажное место занимают плазменные технологии, в частности плазменно-порошковая наплавка. На процесс получения качественного наплавленного материала влияет широкое разнообразие факторов: вид наплавляемого порошка, процентное содержание отдельных компонентов порошковой смеси, теплофизические свойства и температурная зависимость компонентов порошкового материала, их термодинамические константы; скорость и способ подачи порошкового материала в зону наплавки; мощности плазменной дуги, метод и режимы наплавки; величина тепловложения и условия теплоотвода, скорость кристаллизации наплавленного слоя, высоты наплавки, частота сканирования, влияние последующей термообработки.

В работе приведены результаты исследований по влиянию тока I_d плазменной дуги, расстояния h от среза сопла плазмотрона до поверхности заготовки, скорости наплавки и ма-