

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКОВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ VT6 И VT3-1 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ

© 2018 г. Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко, С.Б. Белова, Е.В. Чибисова

Ступинский филиал Московского авиационного института
(национального исследовательского университета) (МАИ (НИУ))

Московский политехнический университет

Статья поступила в редакцию 11.02.17 г., доработана 11.03.17 г., подписана в печать 14.03.17 г.

Исследованы статистические зависимости механических свойств 218 поковок (15 типоразмеров), изготовленных из сплавов VT3-1 и VT6 в 2000–2014 гг., от химического состава (содержания легирующих элементов и примесей, структурных и прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену), типа, подтипа и параметров структуры после отжига, закалки и старения. Установлено, что прочностные и пластические характеристики однотипных поковок изменяются в довольно широких пределах. Оценена доля вариации свойств поковок, обусловленная колебаниями содержания основных компонентов и примесей, а также влиянием типа структуры и размеров структурных составляющих. На основе корреляционного анализа выявлено, что изменение количества каждого легирующего элемента и примеси не сказывается на свойствах поковок или слабо на них влияет. Это обусловлено небольшими интервалами колебаний их концентраций в пределах марочного состава. Однако их суммарное содержание, выраженное через эквиваленты по алюминию и молибдену, может изменяться в довольно широком диапазоне. Статистически обосновано, что доля вариации предела прочности поковок сплавов VT3-1 и VT6, обусловленная влиянием химического состава (в перерасчете на эквиваленты по алюминию и молибдену), может составлять ~25+65 %, а влиянием только типа и подтипа структуры – около 20 %. При совместном действии этих двух факторов (состав + структура) доля вариации может достигать ~50+65 %. Для характеристик пластичности и ударной вязкости этот показатель меньше и лежит в интервале 20–35 %. Предложены математические модели для прогнозирования механических свойств поковок в зависимости от параметров структуры и эквивалентов по алюминию и молибдену.

Ключевые слова: поковки титановых сплавов, химический состав, структура, механические свойства, прогнозирование свойств.

Егорова Ю.Б. – докт. техн. наук, декан факультета, профессор кафедры «Моделирование систем и информационные технологии» Ступинского филиала МАИ (НИУ) (142800, Московская обл., г. Ступино, ул. Пристанционная, 4). E-mail: egorova_mati@mail.ru.

Давыденко Л.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38). E-mail: mami-davidenko@mail.ru.

Белова С.Б. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Моделирование систем и информационные технологии» Ступинского филиала МАИ (НИУ). E-mail: belovamai@gmail.com.

Чибисова Е.В. – нач. отдела науч.-техн. информации Ступинского филиала МАИ (НИУ). E-mail: echibisova@mail.ru.

Для цитирования: Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Белова С.Б., Чибисова Е.В. Прогнозирование механических свойств поковок из титановых сплавов VT6 и VT3-1 в зависимости от химического состава и структуры // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2018. No. 1. С. 12–21. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-1-12-21.

Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Belova S.B., Chibisova E.V.

Forecasting of mechanical properties of VT6 and VT3-1 titanium alloys forgings depending on chemical composition and structure

The paper studies the statistical dependence of the mechanical properties of 218 forgings (15 types) made of VT3-1 and VT6 alloys in 2000–2014 on chemical composition (the content of alloying elements and admixtures, structural and strength equivalents of aluminum and molybdenum), structure types, subtypes and parameters after annealing, quenching and aging. It was found that the strength and plastic properties of one-type forgings vary quite widely. The share of variation of forging properties due to fluctuations in the content of main components and admixtures, as well as the influence of structure types and sizes of structural components was estimated. Based on the correlation analysis it was revealed that the change of each alloying element or admixture content has a little or no effect on forging properties. This is caused by small increments of their change within the grade composition. However, their total content

expressed in terms of aluminum and molybdenum equivalents can vary over a fairly wide range. It was statistically substantiated that the share of tensile strength variation of VT3-1 and VT6 forgings may be $\sim 25\div 65\%$ due to the influence of their chemical compositions (in terms of aluminum and molybdenum equivalents), and about 20 % due to only the influence of structure types and subtypes. When these two factors (composition + structure) are combined, the share of variation can reach $\sim 50\div 65\%$. For plastic properties and impact toughness, this figure is less and ranges from 20 to 35 %. The mathematical models are offered to forecast the mechanical properties of forgings depending on the structure parameters and aluminum and molybdenum equivalents.

Keywords: titanium alloys forgings, chemical composition, structure, mechanical properties, forecasting of properties.

Egorova Yu.B. – Dr. Sci. (Tech.), dean of the faculty, prof., Department «Modeling of systems and information technology», Stupino branch of Moscow Aviation Institute (National Research University) (142800, Russia, Moscow region, Stupino, Pristantsionnaya str., 4). E-mail: egorova_mati@mail.ru.

Davydenko L.V. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department «Materials science», Moscow Polytechnic University (107023, Russia, Moscow, Bol'shaya Semenovskaya str., 38). E-mail: mami-davidenko@mail.ru.

Belova S.B. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department «Modeling of systems and information technology», Stupino branch of Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: belovamai@gmail.com.

Chibisova E.V. – head of Department of scientific and technical information, senior lecturer, Department «Modeling of systems and information technology», Stupino branch of Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: echibisova@mail.ru.

Citation: *Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Belova S.B., Chibisova E.V. Prognostirovanie mekhanicheskikh svoystv pokovok iz titanovykh splavov VT6 i VT3-1 v zavisimosti ot khimicheskogo sostava i struktury. Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya. 2018. No. 1. P. 12–21. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-1-12-21.*

Введение

Для прогнозирования свойств различных материалов, моделирования и проектирования технологических процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки используют различные программные комплексы и системы, из которых наиболее распространенными являются DeForm, QForm, ThermoCalc, JMatPro, ICME и др. [1–18]. Однако они нуждаются в существенной корректировке и адаптации к реальным условиям производства.

Сложность разработки пакетов прикладных программ для прогнозирования обусловлена неоднозначностью влияния типа и параметров структуры на комплекс механических характеристик, а также крайней структурной чувствительностью титановых сплавов, так что свойства даже однотипных полуфабрикатов могут изменяться в довольно широких пределах. Для прогнозирования комплекса свойств промышленных полуфабрикатов целесообразно выявить степень их зависимости от типа и параметров структуры, а также от марочных колебаний химического состава. Для этих целей можно использовать как экспериментальные и литературные данные, так и результаты производственных испытаний и промышленного контроля, которые накоплены в больших количествах на предприятиях — производителях или потребителях титана [19].

Общие закономерности взаимосвязей «структура—свойства» рассмотрены в многочисленных

отечественных и зарубежных работах, в частности в монографиях [20–23] и трудах международных конференций по титану, например докладах [10–17]. Первые систематические исследования в этом направлении были начаты еще в 1970-х годах в ВИЛС М.Я. Бруном с сотр., а основные зависимости механических свойств титановых сплавов от параметров пластинчатой и глобулярной структур были ими обобщены в 1-м (1979 г.) и 2-м (1996 г.) изданиях монографии «Полуфабрикаты из титановых сплавов» [20, 21]. Однако исследования были проведены без учета колебаний химического состава сплавов и на различных видах полуфабрикатов, при этом разные типы структуры и размеры структурных составляющих были получены специально подобранными режимами обработки давлением и термической обработки, далекими от производственных условий. Наиболее полные исследования были выполнены для сплава VT3-1, который в нашей стране до сих пор является одним из самых распространенных сплавов авиационного назначения, несмотря на происходящую в последние годы его замену на сплав VT6.

Цель настоящей работы состояла в исследовании статистических зависимостей механических свойств поковок авиационного назначения из сплавов VT6 и VT3-1 от колебаний марочного состава, типа и параметров структуры и разработке на этой основе методов прогнозирования комплекса механических свойств.

Методика исследований

Объектами исследования послужили 218 поковок (15 типоразмеров) промышленного производства из сплавов ВТ6 и ВТ3-1 разных плавок, изготовленных в 2000–2014 гг. (табл. 1). Первичную статистическую обработку и корреляционно-регрессионный анализ проводили в программе Stadia [24].

Исследуемыми факторами были содержание легирующих элементов и примесей, тип и подтип структуры, размеры структурных составляющих (a_α — диаметр α -зерна, D — размер β -зерна, b_α и l_α — толщина и длина α -пластин, d_α — размер α -колоний), механические свойства (предел прочности — σ_B , относительное удлинение — δ , поперечное сужение — ψ , ударная вязкость — KCU и KCT).

Для оценки степени легирования различных плавок использовали структурные и прочностные эквиваленты: $[Al]_{экв}^{стр}$, $[Al]_{экв}^{пр}$ — по алюминию, $[Mo]_{экв}^{стр}$, $[Mo]_{экв}^{пр}$ — по молибдену, которые определяли по соотношениям, предложенным Б.А. Колачевым с соавт. и приведенным в [23].

Для оценки силы статистической связи между изучаемыми факторами были рассчитаны коэффициенты парной и множественной корреляции (R). Долю вариации (γ) механических свойств, обусловленную влиянием исследуемого фактора, определяли как $\gamma = R^2 \cdot 100$ %. Проверку значимости коэффициентов корреляции и регрессии, адекватности регрессионной модели осуществляли с доверительной вероятностью 0,95 по стандартным методикам [24].

Результаты и их обсуждение

Диапазон и средние значения показателей легирующих элементов, примесей и механических свойств поковок из сплавов ВТ3-1 и ВТ6 всех исследованных типоразмеров в целом соответствуют (табл. 2) нормативной документации (НД).

Однако прочностные свойства и характеристики пластичности могут изменяться в довольно широких пределах. Так, например, разница между максимальным и минимальным значениями предела прочности для однотипных поковок может достигать ~ 150 МПа, коэффициент вариации составляет $\gamma = 2\div 5$ %. Более высокий разброс значений имеют ударная вязкость и характеристики пластичности. У последних величина коэффициента вариации на порядок выше, чем для предела прочности: $\gamma = 6\div 18$ %. Колебания механических свойств могут существенно зависеть от химического состава и структуры, во многом определяемой конкретной технологией штамповки, габаритами поковок и режимами термической обработки.

Для того чтобы оценить степень влияния колебаний химического состава на разброс механических свойств, для каждого типоразмера были определены коэффициенты парной и множественной корреляции (табл. 3, 4).

Изменение содержания каждого элемента по отдельности или не влияет, или слабо влияет на свойства поковок — скорее всего, это обусловлено небольшими интервалами их изменения в пределах марочного состава. Однако их совместное действие, которое можно оценить с помощью интегральных характеристик химического состава —

Таблица 1
Объекты исследования

Сплав	Поковки			Количество образцов*	Направление вырезки образцов	Термическая обработка
	Вид	Типоразмер	Количество			
ВТ3-1	Штампованные	№ 1–13	183	383	Продольное, поперечное	Изотермический отжиг 920–960 °С, 1–3 ч + 550–650 °С, 2 ч, воздух
ВТ6	Кованные	№ 14	8	36	Поперечное	Отжиг 750–850 °С, 2–3 ч, воздух
ВТ6	Штампованные	№ 15	27	1261	Тангенциальное	Закалка 930–950 °С, 2 ч, вода + старение при 750 °С, 2 ч, воздух

* На растяжение, ударный изгиб.

Таблица 2

Статистические характеристики эквивалентов по алюминию и молибдену и механических свойств штампованных поковок из сплава ВТ3-1

Статистические характеристики	[Al] _{экв} ^{стр} , %	[Mo] _{экв} ^{стр} , %	[Al] _{экв} ^{пр} , %	[Mo] _{экв} ^{пр} , %	σ _B , МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м ²
Типоразмер № 1, продольное направление								
Диапазон по НД*	—	—	—	—	950–1200	≥10	≥25	≥0,3
Диапазон значений по факту	7,6–8,3	5,4–6,5	9,7–10,8	4,5–5,3	1024–1116	12,8–22,4	27,1–49,0	0,31–0,68
Выборочное среднее (\bar{x})	7,9	6,0	10,1	4,9	1068	17,6	38,1	0,43
Стандартное отклонение (S)	0,28	0,42	0,40	0,32	22,1	2,1	4,1	0,07
Коэффициент вариации (γ), %	3,6	7,0	3,9	6,5	2,0	11,9	10,7	16,2
Типоразмер № 9, поперечное направление								
Диапазон по НД*	—	—	—	—	950–1200	≥8	≥20	≥0,3
Диапазон значений по факту	7,7–8,3	5,7–6,5	9,7–10,7	4,7–5,4	1006–1162	9,0–17,2	20,0–35,5	0,33–0,56
Выборочное среднее (\bar{x})	7,9	6,1	10,1	5,0	1075	12,0	26,0	0,39
Стандартное отклонение (S)	0,16	0,25	0,27	0,20	36,0	2,2	3,7	0,05
Коэффициент вариации (γ), %	2,0	4,0	2,6	4,0	3,3	18,3	14,3	13,4

* ТУ 1-805-090-80.

таких, как структурные ([Al]_{экв}^{стр}, [Mo]_{экв}^{стр}), и прочностные ([Al]_{экв}^{пр}, [Mo]_{экв}^{пр}) эквиваленты, оказалось более существенным и значимым.

По нормативной документации диапазон легирования алюминием, ванадием и молибденом составляет 1,0–1,5 %. Фактический интервал легирования основными компонентами был 0,5–1,2 %, а «трехсигмовый» — от 0,75 до 1,5 %, что соответствует ~0,5÷1,0 поля допуска. Это привело к тому, что суммарное содержание легирующих элементов и примесей, выраженное через эквиваленты по алюминию и молибдену, может изменяться в довольно широком диапазоне (см. табл. 4). Абсолютная разница между максимальными и минимальными значениями может достигать ~2÷3 %, а «трехсигмовый» интервал — 3÷4 %. В итоге доля вариации предела прочности поковок разных типоразмеров, обусловленная колебаниями химического состава, выраженного через эквиваленты по алюминию и молибдену, может колебаться в пределах γ = 25÷65 % (см. табл. 4). При этом чем больше «трехсигмовый» интервал легирования, тем выше доля вариации прочности (рис. 1). Для характеристик пластичности и ударной вязкости γ ~ 10÷30 %.

Полученные результаты показывают, что предел прочности может достаточно сильно зависеть от колебаний химического состава сплавов, в то время как другие свойства в меньшей степени реа-

гируют на изменение степени легирования (рис. 2). Возможно, это связано с тем, что при корреляционном анализе не была учтена роль структуры поковок. Этот фактор может иметь существенное значение, так как на основе многочисленных экспериментальных данных было установлено, что из стандартных свойств наиболее чувствительны

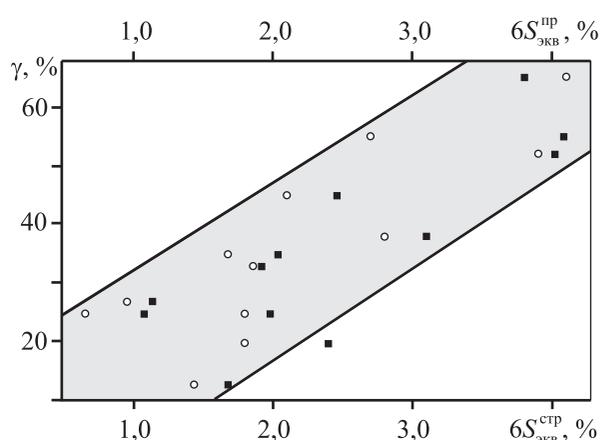


Рис. 1. Зависимость доли вариации (γ) предела прочности, обусловленной колебаниями марочного состава, от величины статистического диапазона легирования поковок сплавов ВТ6 и ВТ3-1

6S_{экв}^{стр} — величина «трехсигмового» интервала для фактора [Al]_{экв}^{стр} + [Mo]_{экв}^{стр} (○)

6S_{экв}^{пр} — величина «трехсигмового» интервала для фактора [Al]_{экв}^{пр} + [Mo]_{экв}^{пр} (■)

Таблица 3
Коэффициенты корреляции между механическими свойствами и химическим составом поковок сплава ВТЗ-1

Фактор	Коэффициент корреляции (R)*			
	σ_B	δ	ψ	KCU
Типоразмер № 1, продольное направление				
Al	0,64	-0,21	-0,4	-0,4
Mo	0,56	-0,1	-0,2	-0,3
Cr	0,55	0,01	-0,2	-0,4
C	0,33	-0,17	-0,1	-0,2
Fe	0,45	-0,02	-0,24	-0,2
N	0,17	-0,1	0,1	0,1
O	0,13	-0,3	0,2	0,1
[Al] _{экв} ^{стр}	0,54	-0,26	-0,5	-0,3
[Mo] _{экв} ^{стр}	0,56	-0,21	-0,35	-0,25
[Al] _{экв} ^{стр} , [Mo] _{экв} ^{стр}	0,66	0,22	0,53	0,33
Типоразмер № 9, поперечное направление				
Al	0,37	-0,23	-0,44	-0,27
Mo	0,48	-0,3	-0,28	-0,6
Cr	0,17	0,12	-0,24	-0,4
C	0,1	0,13	-0,4	-0,14
Fe	0,14	0,14	-0,12	-0,1
N	0,3	-0,28	0,15	-0,16
O	0,4	-0,15	0,1	-0,23
[Al] _{экв} ^{стр}	0,5	0,23	-0,38	-0,33
[Mo] _{экв} ^{стр}	0,4	0,21	-0,32	-0,52
[Al] _{экв} ^{стр} , [Mo] _{экв} ^{стр}	0,51	0,22	0,4	0,53

* Жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.

к типу структуры характеристики пластичности, особенно поперечное сужение [20–23].

Долю вариации свойств, обусловленную структурным влиянием, можно оценить, если ввести в статистическую обработку структурные факторы (тип и подтип структуры, размеры структурных составляющих). Данные металлографического анализа показали, что поковки сплава ВТЗ-1 имели допустимые структуры I–V типов в соответствии с типовой шкалой структур (табл. 5, рис. 3), при этом приблизительно 90–95 % исследованных поковок имели преимущественно равноосную (I тип), переходную (II тип) и смешанную (III тип)

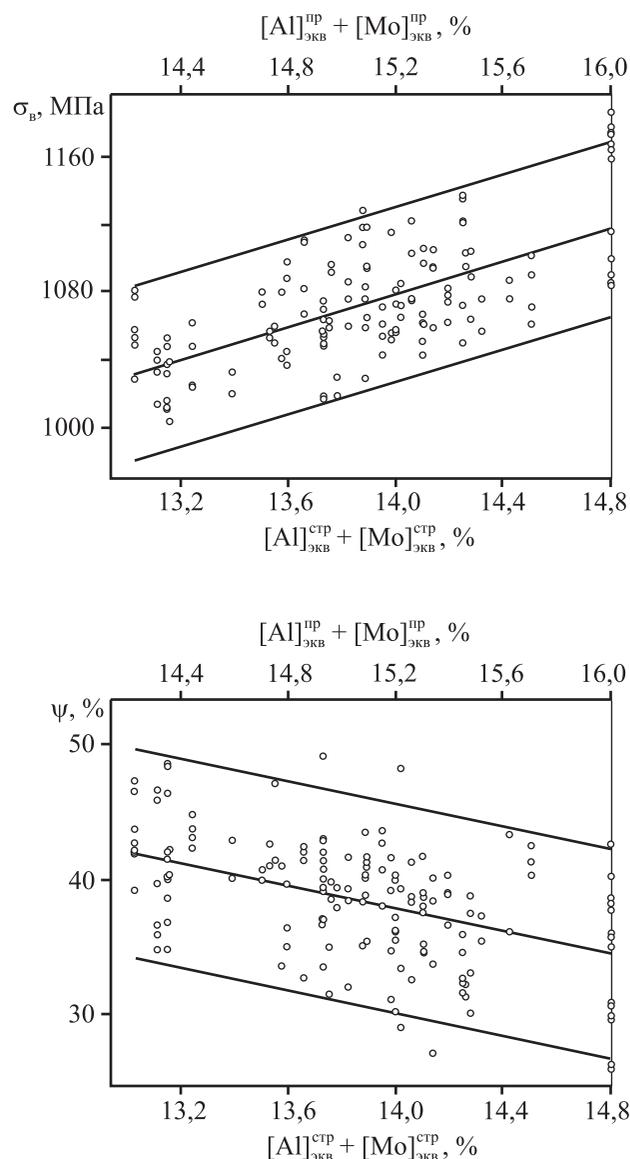


Рис. 2. Зависимость предела прочности (σ_B) и поперечного сужения (ψ) от степени легирования поковок сплава ВТЗ-1

структуры. Пластинчатые структуры IV типа (без оторочки по границе β -зерна) и V типа (с видимой границей зерен) в основном встречались в виде комбинации с другими структурами.

Средние значения механических свойств в целом незначительно зависят от типа структуры (см. табл. 5). Вместе с тем можно отметить, что образцы с глобулярной структурой имеют более высокие характеристики прочности по сравнению со смешанными и пластинчатыми структурами. При переходе от структуры типа I к типу V (т.е. от равноосной к переходной, смешанной и далее к пластинчатой) наблюдается снижение предела проч-

Таблица 4

Результаты корреляционного анализа зависимости предела прочности поковок из сплавов ВТ6 и ВТ3-1 от эквивалентов по алюминию и молибдену

Типоразмер поковки	Количество образцов	$[Al]_{\text{экв}}^{\text{стр}} + [Mo]_{\text{экв}}^{\text{стр}}, \%$	$[Al]_{\text{экв}}^{\text{пр}} + [Mo]_{\text{экв}}^{\text{пр}}, \%$	$\sigma_B, \text{МПа}$	R	$\gamma, \%$
Сплав ВТ3-1 (продольное направление)						
№ 1	62	$\frac{13,0-14,8}{0,65}$	$\frac{14,2-16,1}{0,67}$	$\frac{1024-1116}{22}$	0,66	42
№ 2	24	$\frac{13,1-14,4}{0,45}$	$\frac{14,0-16,1}{0,68}$	$\frac{1004-1095}{24}$	0,75	55
№ 3	14	$\frac{13,7-14,6}{0,30}$	$\frac{14,8-16,0}{0,40}$	$\frac{1017-1101}{20}$	0,40	20
№ 4	10	$\frac{13,5-14,3}{0,24}$	$\frac{14,6-15,6}{0,28}$	$\frac{1040-1104}{18}$	0,35	13
№ 5	36	$\frac{13,0-14,8}{0,65}$	$\frac{14,0-15,9}{0,63}$	$\frac{1020-1172}{37}$	0,81	65
№ 6	14	$\frac{13,5-14,6}{0,16}$	$\frac{14,7-15,6}{0,19}$	$\frac{1029-1122}{20}$	0,52	27
Сплав ВТ3-1 (поперечное направление)						
№ 7	36	$\frac{13,4-14,6}{0,31}$	$\frac{14,5-15,6}{0,32}$	$\frac{1059-1150}{23}$	0,58	33
№ 8	38	$\frac{13,4-14,6}{0,30}$	$\frac{14,4-15,9}{0,33}$	$\frac{1030-1146}{24}$	0,50	25
№ 9	44	$\frac{13,4-14,7}{0,35}$	$\frac{14,3-15,9}{0,41}$	$\frac{1006-1162}{24}$	0,58	35
Сплав ВТ6 (поперечное направление)						
№ 14	36	$\frac{12,3-12,8}{0,11}$	$\frac{13,3-13,8}{0,18}$	$\frac{964-1017}{21}$	0,50	25
Сплав ВТ6 (тангенциальное направление)						
№ 15	653	$\frac{12,0-13,1}{0,28}$	$\frac{13,1-13,9}{0,34}$	$\frac{1028-1115}{24}$	0,58	35
Примечание. В числителе – диапазон значений, в знаменателе – стандартное отклонение (S). Жирным шрифтом выделены значимые значения.						

ности в среднем приблизительно на 20–30 МПа. Более высокие значения характеристик пластичности и ударной вязкости выявлены для образцов со смешанной и глобулярной структурами. Полученные результаты (см. табл. 5) показывают, что доля вариации предела прочности и относительного сужения, обусловленная влиянием структуры, составляет 18–20 и 10–15 % соответственно. Увеличение параметров всех типов структур приводит к уменьшению предела прочности поковок сплава ВТ3-1 и повышению характеристик пластичности, особенно поперечного сужения (рис. 4).

На основе регрессионного анализа было полу-

чено несколько линейных и нелинейных моделей, адекватных экспериментальным данным. Однако более высокие статистические характеристики имеют соотношения (1) и (2), аналогичные уравнению Петча–Холла [23]. Зависимости предела прочности (σ_B , МПа) от размера (мкм) α -зерен (диаметра – a_α , толщины – b_α , длины – l_α) для структур I типа (модель (1)) и II типа (модель (2)) можно представить в виде

$$\sigma_B = \sigma_0 + (133 \pm 20)a_\alpha^{-1/2}, \quad (1)$$

$$\sigma_B = \sigma_0 + (58 \pm 12)b_\alpha^{-1/2} + (30 \pm 8)l_\alpha^{-1/2}, \quad (2)$$

где σ_0 – свободный член, зависящий от конкрет-

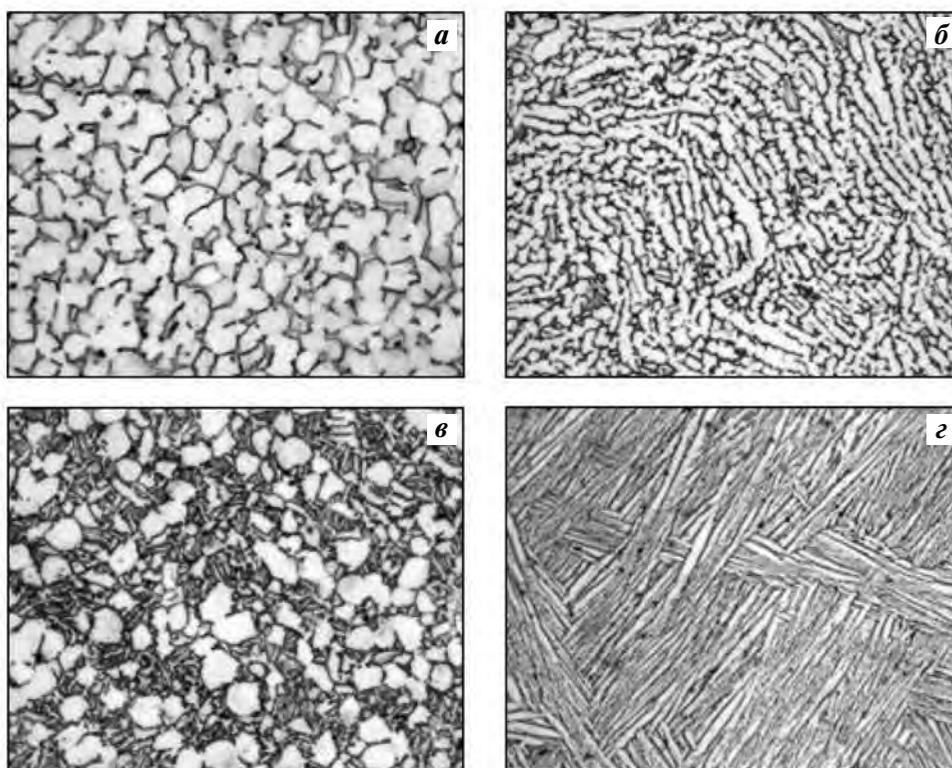


Рис. 3. Микроструктура поковок сплава ВТ3-1 (×500)

a – равноосная структура с глобулярной формой α -зерен (I тип); *б* – равноосная с вытянутой формой α -зерен (II тип); *в* – смешанная (III тип); *г* – пластинчатая (V тип)

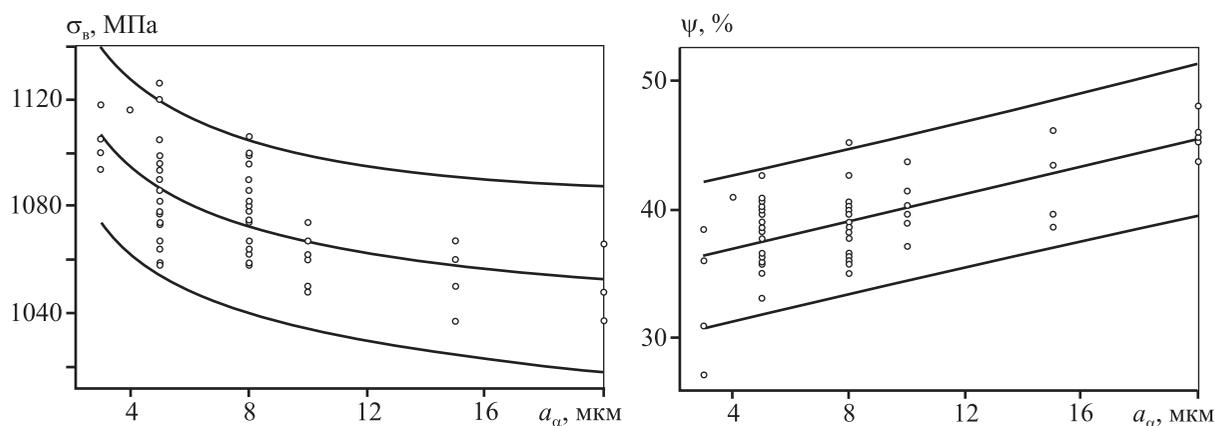


Рис. 4. Зависимость предела прочности (σ_b) и поперечного сужения (ψ) от размера α -зерна (I тип структуры) сплава ВТ3-1

ного химического состава, количества легирующих элементов и их взаимодействия между собой, наличия текстуры, тонкого строения фаз и т.п. Статистические характеристики следующие: для модели (1) — коэффициент корреляции $R = 0,67$, доля вариации $\gamma = 45 \%$, статистическая ошибка $S = 17$ МПа; для модели (2) — $R = 0,76$, $\gamma = 60 \%$, $S = 15$ МПа.

Для поперечного сужения получены соотношения

$$\psi = \psi_0 + (0,58 \pm 0,12) a_\alpha, \quad (3)$$

$$\psi = \psi_0 + (0,41 \pm 0,1) b_\alpha + (0,2 \pm 0,08) l_\alpha. \quad (4)$$

Статистические характеристики для моделей (3) и (4) следующие: $R = 0,45$, $\gamma = 20 \%$, $S = 3 \%$ и $R = 0,48$, $\gamma = 23 \%$, $S = 4 \%$ соответственно.

Таблица 5
Механические свойства образцов сплава ВТЗ-1 с разной структурой

Тип структуры		Доля образцов, %	Размер* α -зерна, мкм	Длина α -зерна, мкм	σ_B , МПа		ψ , %		KCU , МДж/м ²	
Обозначение	Название				Диапазон	Среднее**	Диапазон	Среднее**	Диапазон	Среднее**
Типоразмер № 1 (продольное направление)										
I	Равноосная	30	3–20	–	1047–1116	1077±9,5	27,1–45,2	38,7±1,5	0,31–0,68	0,49±0,04
II	Переходная	45	3–20	10–25	1029–1105	1066±8,7	27,1–48,2	39,7±1,4	0,31–0,60	0,41±0,02
III	Смешанная	17	$\frac{10-20}{3-5}$	–	1024–1100	1066±9,3	36,0–49,0	43,2±1,9	0,36–0,53	0,40±0,04
V	Пластинчатая	8	5–10	–	1024–1094	1054±8,8	27,1–44,8	38,0±1,6	0,33–0,48	0,40±0,05
Разброс свойств					92	23	21,1	5,2	0,37	0,09
Доля вариации свойств из-за структуры, %					20		15		15	
Типоразмер № 9 (поперечное направление)										
I	Равноосная	10	5–15	–	1074–1124	1097±18,5	22,3–28,7	27,4±1,8	0,34–0,44	0,37±0,03
II	Переходная	45	5–20	10–25	1006–1162	1071±14,8	20,2–35,5	25,7±1,5	0,3–0,56	0,40±0,02
III	Смешанная	40	$\frac{5-25}{1-5}$	–	1006–1115	1074±12,2	20,2–35,5	27,0±1,2	0,33–0,56	0,38±0,02
IV и V	Пластинчатая	5	5–25	–	1014–1089	1064±21,0	22,0–30,5	24,0±2,2	0,30–0,46	0,30±0,05
Разброс свойств					156	33	15,5	3,4	0,26	0,10
Доля вариации свойств из-за структуры, %					18		15		12	
* Для равноосной структуры указан диаметр α -зерна, для переходной – толщина α -зерна, для смешанной – диаметр α -зерна (числитель) и толщина α -пластин (знаменатель), для пластинчатой – толщина α -пластин.										
** Приведен доверительный интервал с вероятностью 0,95.										

На основе регрессионного анализа было установлено, что для сплавов ВТ6 и ВТЗ-1 свободные члены σ_0 и ψ_0 можно оценить в зависимости от химического состава следующим образом:

$$\sigma_0 = 235k_\sigma + (60 \pm 5)[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{пр}} + (50 \pm 5)[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{пр}}, \quad (5)$$

$$\psi_0 = 80k_\psi - (2,5 \pm 0,5)[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{пр}} - (0,5 \pm 0,2)[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{пр}}, \quad (6)$$

где 235 МПа и 80 % — предел прочности и поперечное сужение титана высокой чистоты [12]; k_σ и k_ψ — эмпирические (поправочные) коэффициенты, которые зависят от типа полуфабриката и конкретной технологии его изготовления и могут быть определены на основе данных статистического контроля или производственных испытаний.

Проверка полученных зависимостей показала хорошую сходимость расчетных и фактических значений механических свойств. Полученные результаты можно использовать не только для прогнозирования свойств поковок и разработки паке-

тов прикладных программ, но и для обоснования режимов обработки давлением и термической обработки, обеспечивающих формирование регламентируемой структуры, для моделирования и оптимизации технологических процессов производства полуфабрикатов, а также для обеспечения высокого качества изделий [25]. В частности, для повышения стабильности, однородности и воспроизводимости химического состава и свойств полуфабрикатов целесообразно ужесточить установленные пределы диапазона легирования до уровня, принятого в зарубежных стандартах.

Выводы

1. Статистически обосновано, что доля вариации предела прочности поковок сплавов ВТЗ-1 и ВТ6, обусловленная влиянием только химического состава, может составлять ~25÷65 %, а определяемая только типом и подтипом структуры — около

20 %. При совместном учете этих двух факторов (состав + структура) величина γ может достигать ~50÷65 %. Для характеристик пластичности и ударной вязкости этот показатель меньше — в пределах 20—35 %.

2. Для поковок сплава ВТЗ-1 с равноосной и переходной структурами получены регрессионные зависимости, позволяющие оценить средний уровень стандартных механических свойств в зависимости от химического состава и структуры с вероятностью 0,95.

Литература

1. DEFORM™. URL: <http://www.deform.com> (дата обращения: 28.01.2017).
2. QFORM. URL: <http://www.qform3d.ru> (дата обращения: 28.01.2017).
3. ThermoCalc. URL: www.thermocalc.com (дата обращения: 28.01.2017).
4. JMatPro. URL: www.senteseoftware.co.uk (дата обращения: 28.01.2017).
5. Saunders N., Guo Z., Li X., Miodownik A.P., Schillé J.P. Using JMatPro to model materials properties and behavior // JOM. 2003. Dec. P. 60—65.
6. Gabidullin A.E., Ovchinnikov A.V., Alpatov V.P., Chernoglazova T.A. Prediction of the structural state and properties of pressed aluminum semifinished products with the use of a QFORM CAD system // Russ. J. Non-Ferr. Met. 2009. Vol. 50. No. 3. P. 242—245.
7. Panchal J.H., Kalidindi S.R., McDonnell D.L. Key computational modeling issues in integrated computational materials engineering // Comput. Aided Des. 2013. Vol. 45. P. 4—25.
8. Salem A.A., Shaffer J.B., Sadko D.P., Semiatin S.L., Kalidindi S.R. Workflow for integrating mesoscale heterogeneities in materials structure with process simulation of titanium alloys // Integr. Mater. Manuf. Innov. 2014. URL: <http://link.springer.com/article/10.1186/s40192-014-0024-6> (дата обращения: 28.01.2017).
9. Arnold S.M., Holland F.A., Bednarczyk B.A., Peneda E.J. Combining material and model pedigree is foundational to making ICME a reality // Integr. Mater. Manuf. Innov. 2015. URL: <http://link.springer.com/article/10.1186/s40192-015-0031-2> (дата обращения: 28.01.2017).
10. Saunders N. An integrated approach to the calculation of materials properties for Ti-alloys // Titanium-2003. Science and Technology: Proc. 10th World conf. on titanium (Hamburg, Germany, 13—8 July 2003). 2003. Vol. 1—5. P. 3027—3032.
11. Collins P.C., Connors S., Banerjee R., Fraser H.L. A combinatorial approach to the development of neural networks for the prediction of composition-microstructure-property relationships in α/β Ti alloys // Titanium-2003. Science and Technology: Proc. 10th World conf. on titanium (Hamburg, Germany, 13—18 July 2003). 2003. Vol. 1—5. P. 1389—1396.
12. Guo Z., Turner R., Da Silva A.D., Saunders N., Schroeder F., Cetlin P.R., Schillé J.-P. Introduction of materials modelling into processing simulation // Mater. Sci. Forum. 2013. Vol. 762. P. 266—276.
13. Malinov S., Sha W. Application of artificial neural networks for modeling correlations in titanium alloys // Mater. Sci. Eng. A. 2004. Vol. 365. P. 202—211.
14. Saunders N., Guo Z., Li X., Miodownik A.P., Schillé J.P. Computer modelling of materials properties and behavior // 10th Int. symp. on superalloys (Champion, Pennsylvania, 19—23 Sept. 2004). 2004. P. 849—858.
15. Guo Z., Saunders N., Li X., Miodownik A.P., Schillé J.P. Modelling phase transformations and material properties of commercial titanium alloys // Rare Metal Mater. Eng. 2006. Vol. 35 (Sub. 1). P. 108—111.
16. Yang H.Y., Le Q.H., Zhao Y.Q. Research on the intelligent approach of material property prediction and optimization // Titanium-2003. Science and Technology: Proc. 10th World conf. on titanium (Hamburg, Germany, 13—18 July 2003). 2003. Vol. 1—5. P. 1405—1412.
17. Furrer D., Chatterjee A., Shen G., Woodfield A., Semiatin S.L., Miller J., Glavicic M., Goetz R., Barker D. Development and application of microstructure and mechanical properties models for titanium alloys // Titanium-2007. Science and Technology: Proc. 11th World conf. on titanium (Kioto, Japan, 3—7 June 2007). 2007. P. 781—784.
18. Носов В.К., Нестеров П.А., Ермаков Е.И. 3D-моделирование структурного строения однофазных твердых растворов α -титановых сплавов // Металловедение и терм. обраб. металлов. 2016. No. 3. С. 34—39.
19. Егорова Ю.Б., Уваров В.Н., Давыденко Л.В., Давыденко Р.А. Использование результатов промышленного контроля для прогнозирования механических свойств полуфабрикатов из титановых сплавов // Металловедение и терм. обраб. металлов. 2017. No. 6. С. 52—58.
20. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А., Брун М.Я., Гельман А.А., Домнин И.И., Дьяконов Ю.А., Елагина Л.А., Ерманык М.З., Зверева З.Ф., Каганович А.З., Каганович И.Н., Казаков К.А., Кушакевич С.А., Ловцов В.М., Локшин М.З., Плотникова Т.П., Полькин И.С., Сигалов Ю.М., Соболев Ю.П., Согришин Ю.П., Тетюхин В.В., Усова В.В., Цапалова Н.К. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: Металлургия, 1979.
21. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Белозеров А.П., Бочвар Г.А., Брун М.Я., Гельман А.А., Данилкин В.А., Дьяконов Ю.А., Евменов О.П., Ерманык М.З., Илларионов Э.И., Исаев А.А., Казаков К.А., Королева А.И., Корякин С.С., Кушакевич С.А., Ледер О.Р., Ловцов В.М., Локшин М.З., Микляев П.Г., Павлов С.В., Перцовский Н.З., Пилипенко А.Л., Плотникова Т.П., Полькин И.С., Русанов Н.В., Сигалов Ю.М., Слобцов П.И., Соболев Ю.П., Согришин Ю.П., Тетюхин В.В., Тимофеева Л.Н., Усова В.В., Цапалова Н.К., Шамраев В.Н., Шаханова Г.В., Шилин О.К. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: ВИЛС, 1996.
22. Колачев Б.А., Мальков А.В. Физические основы разрушения титана. М.: Металлургия, 1983.
23. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС—МАТИ, 2009.
24. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. М.: Форум—Инфра-М, 2006.
25. Егорова Ю.Б., Полькин И.С., Давыденко Л.В. Возможности повышения качества поковок дисков сплава ВТ6 путем корректировки химического состава // Технол. легких сплавов. 2015. No. 3. С. 65—71.

References

1. DEFORM™. URL: <http://www.deform.com> (accessed: 28.01.2017).
2. QFORM. URL: <http://www.qform3d.ru> (accessed: 28.01.2017).
3. ThermoCalc. URL: www.thermocalc.com (accessed: 28.01.2017).
4. JMatPro. URL: www.senteseoftware.co.uk (accessed: 28.01.2017).
5. Saunders N., Guo Z., Li X., Miodownik A.P., Schillé J.-Ph. Using JMatPro to model materials properties and behavior. *JOM*. 2003. Dec. P. 60—65.
6. Gabidullin A.E., Ovchinnikov A.V., Alpatov V.P., Chernoglasova T.A. Prediction of the structural state and properties of pressed aluminum semifinished products with the use of a QFORM CAD system. *Russ. J. Non-Ferr. Metals*. 2009. Vol. 50. No. 3. P. 242—245.
7. Panchal J.H., Kalidindi S.R., McDonell D.L. Key computational modeling issues in integrated computational materials engineering. *Comput. Aided Dis.* 2013. Vol. 45. P. 4—25.
8. Salem A.A., Shaffer J.B., Sadko D.P., Semiatin S.L., Kalidindi S.R. Workflow for integrating mesoscale heterogeneities in materials structure with process simulation of titanium alloys. *Integr. Mater. Manuf. Innov.* 2014. URL: <http://link.springer.com/article/10.1186/s40192-014-0024-6> (accessed: 28.01.2017).
9. Arnold S.M., Holland F.A., Bednarczyk B.A., Peneda E.J. Combining material and model pedigree is foundational to making ICME a reality. *Integr. Mater. Manuf. Innov.* 2015. URL: <http://link.springer.com/article/10.1186/s40192-015-0031-2> (дата обращения 28.01.2017).
10. Saunders N. An integrated approach to the calculation of materials properties for Ti-alloys. In: *Titanium-2003. Science and Technology*: Proc. 10th World conf. on titanium (Hamburg, Germany, 13—8 July 2003). 2003. Vol. 1—5. P. 3027—3032.
11. Collins P.C., Connors S., Banerjee R., Fraser H.L. A combinatorial approach to the development of neural networks for the prediction of composition-microstructure-property relationships in α/β Ti alloys. In: *Titanium-2003. Science and Technology*: Proc. 10th World conf. on titanium (Hamburg, Germany, 13—18 July 2003). 2003. Vol. 1—5. P. 1389—1396.
12. Guo Z., Turner R., Da Silva A.D., Saunders N., Schroeder F., Cetlin P.R., Schill J.-P. Introduction of materials modelling into processing simulation. *Mater. Sci. Forum*. 2013. Vol. 762. P. 266—276.
13. Malinov S., Sha W. Application of artificial neural networks for modeling correlations in titanium alloys. *Mater. Sci. Eng. A*. 2004. Vol. 365. P. 202—211.
14. Saunders N., Guo Z., Li X., Miodownik A.P., Schillé J.P. Computer modelling of materials properties and behavior. In: *10th Int. symp. on superalloys* (Champion, Pennsylvania, 19—23 Sept. 2004). 2004. P. 849—858.
15. Guo Z., Saunders N., Li X., Miodownik A.P., Schillé J.P. Modelling phase transformations and material properties of commercial titanium alloys. *Rare Metal Mater. Eng.* 2006. Vol. 35 (Sub. 1). P. 108—111.
16. Yang H.Y., Le Q.H., Zhao Y.Q. Research on the intelligent approach of material property prediction and optimization. In: *Titanium-2003. Science and Technology*: Proc. 10th World conf. on titanium (Hamburg, Germany, 13—18 July 2003). 2003. Vol. 1—5. P. 1405—1412.
17. Furrer D., Chatterjee A., Shen G., Woodfield A., Semiatin S.L., Miller J., Glavicic M., Goetz R., Barker D. Development and application of microstructure and mechanical properties models for titanium alloys. In: *Titanium-2007. Science and Technology*: Proc. 11th World conf. on titanium (Kioto, Japan, 3—7 June 2007). 2007. P. 781—784.
18. Nosov V.K., Nesterov P.A., Ermakov E.I. 3D modelirovanie strukturnogo stroeniya odnofaznykh tverdykh rastvorov α -titanovykh splavov [3D modeling of a structural structure of single-phase solid solutions of α -titanium alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2016. No. 3. P. 34—39.
19. Egorova Yu.B., Uvarov V.N., Davydenko L.V., Davydenko R.A. Ispol'zovanie rezul'tatov promyshlennogo kontrolya dlya prognozirovaniya mekhanicheskikh svoystv polufabrikatov iz titanovykh splavov [Use of results of industrial control for forecasting of mechanical properties of semifinished products from titanium alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2017. No. 6. P. 52—58.
20. Aleksandrov V.K., Anoshkin N.F., Bochvar G.A., Brun M.Ya., Gel'man A.A., Domnin I.I., D'yakonov Yu.A., Elagina L.A., Ermanyuk M.Z., Zvereva Z.F., Kaganovich A.Z., Kaganovich I.N., Kazakov K.A., Kushakevich S.A., Lovtsov V.M., Lokshin M.Z., Plotnikova T.P., Pol'kin I.S., Sigalov Yu.M., Sobolev Yu.P., Sogrishin Yu.P., Tetyukhin V.V., Usova V.V., Tsapalova N.K. Polufabrikaty iz titanovykh splavov [Semi-finished products from titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1979.
21. Aleksandrov V.K., Anoshkin N.F., Belozherov A.P., Bochvar G.A., Brun M.Ya., Gel'man A.A., Danilkin V.A., D'yakonov Yu.A., Evmenov O.P., Ermanyuk M.Z., Illarionov E.I., Isaev A.A., Kazakov K.A., Koroleva A.I., Koryakin S.S., Kushakevich S.A., Leder O.R., Lovtsov V.M., Lokshin M.Z., Miklyaev P.G., Pavlov S.V., Pertsovskii N.Z., Pilipenko A.L., Plotnikova T.P., Pol'kin I.S., Rusanov N.V., Sigalov Yu.M., Slobtsov P.I., Sobolev Yu.P., Sogrishin Yu.P., Tetyukhin V.V., Timofeeva L.N., Usova V.V., Tsapalova N.K., Shamraev V.N., Shakhanova G.V., Shilin O.K. Polufabrikaty iz titanovykh splavov [Semi-finished products from titanium alloys]. Moscow: VILS, 1996.
22. Kolachev B.A., Mal'kov A.V. Fizicheskie osnovy razrusheniya titana [Physical bases of destruction of the titan]. Moscow: Metallurgiya, 1983.
23. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva [Titanium alloys. Composition, structure, properties]. Moscow: VILS—MATI, 2009.
24. Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh [Methods and means of the complex analysis of data]. Moscow: Forum—Infra-M, 2006.
25. Egorova Yu.B., Pol'kin I.S., Davydenko L.V. Vozmozhnosti povysheniya kachestva pokovok diskov splava VT6 putem korrrektirovki khimicheskogo sostava [Possibilities of improvement of quality of forgings of disks of VT6 alloy by correction of the chemical composition]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2015. No. 3. P. 65—71.