

УДК 621.73.042

doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-29-36

Влияние оптимизированной структуры заготовки из ВТ6 на качество обработанной поверхности при лезвийной обработке

П.А. Головкин¹, А.В. Волков², А.В. Крюков²

¹ АО «Плутон»

² АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

Influence of the VT6 Alloy Optimized Structure on the Quality of the Machined Surface During Blade Processing

P.A. Golovkin¹, A.V. Volkov², A.V. Krykov²

¹ JSC "Pluton"

² JSC Central Scientific Research Radio Engineering Institute named after Academician A.I. Berg

В настоящее время отсутствуют нормативные документы, регламентирующие целесообразную технологию изготовления деталей из титановых сплавов на этапах от горячей пластической деформации до получения механически обработанной (чистовой) детали в части обеспечения ее качественной поверхности и структуры. То есть не отслеживается сквозное влияние превращений материала заготовки на характеристики, формируемые более чем через один технологический переход, — наследственность. Это усложняет достижение заданных характеристик конечного изделия и удорожает его изготовление. На примере титанового сплава средней прочности ВТ6 проведены исследования, позволившие выявить зависимость между параметрамиковки и стабильностью процесса обработки резанием, качеством поверхности и структурой материала получаемой детали. Предложенные на основе синергетического подхода технологические решения должны обеспечить сбалансированное улучшение указанных параметров и устранение недостатков исходного полуфабриката.

Ключевые слова: титановый сплав, температура деформации, обрабатываемость заготовок, качество поверхности, нагрузка на режущий инструмент, твердость материала

Currently, there are no normative documents regulating the appropriate technology of manufacturing parts from titanium alloys at the stage from hot plastic deformation to obtaining a machined (finished) part in terms of ensuring its high-quality surface and structure. Namely, the end-to-end effect of the transformations of the workpiece material on its characteristics formed through more than one technological transition, its heredity, is not tracked. This makes it difficult to achieve the desired characteristics of the final product and increases the cost of its manufacture. We studied VT6, a titanium alloy of medium strength, and found the relationship between the parameters of forging and the stability of the cutting process, the quality of the surface and the structure of the material of the resulting part. Technological solutions proposed on the basis of a synergistic approach should provide a balanced improvement of the specified parameters and eliminate the shortcomings of the original semi-finished product.

Keywords: titanium alloy, deformation temperature, workpiece machinability, surface quality, load on the cutting tool, material hardness

На сегодняшний день отсутствуют нормативные документы, регламентирующие целесообразную технологию изготовления деталей из титановых сплавов на этапах от горячей пластической деформации до получения механически обработанной (чистовой) детали в части обеспечения ее качественной поверхности и структуры. То есть не отслеживается сквозное влияние превращений материала заготовки на характеристики, формируемые более чем через один технологический переход, — наследственность. Это усложняет достижение заданных характеристик конечного изделия и удорожает его изготовление.

Цель статьи — разработка технологических приемов, направленных на повышение конструктивной прочности и улучшение обрабатываемости материала на основе комплексного (синергетического) подхода.

С использованием комплексного подхода [1] проанализировано влияниековки по специальным режимам на качество структуры и обрабатываемость заготовок из титанового сплава ВТ6 [2]. Исследование проведено на исходном прутке [3] и поковке, полученной по схеме № 2 ВИАМ [4] с нагревом до рекомендуемой температуры 950...960 °С [5].

Поковки подвергали нормализации при температуре 850±10 °С с выдержкой 1 ч и охлаждением на воздухе [6]. Предварительная обработка поковок и прутковых заготовок обеспечивала размеры образцов Ø58×110 мм с чистой поверхностью Rz не менее 3,2 мм.

Как и предварительную механическую обработку прутковых заготовок, чистовое точение образцов выполняли на токарно-винторезном станке 16К20 выпуска 1991 г., прошедшем про-

верку на технологическую точность, при частоте вращения шпинделя $n = 200 \text{ мин}^{-1}$, глубине резания $t = 0,25 \text{ мм}$ и подаче $S = 0,4 \text{ мм/об}$. Образцы обрабатывали при одинаковых условиях.

Нагрузки на режущий инструмент по осям X, Y, Z [7] (рис. 1) определяли с помощью динамометра УДМ-600 и программного обеспечения L-CARD. Чтобы исключить влияние износа инструмента на результаты измерений, при точении каждого образца использовали новый прямой проходной резец [8].

Анализ металлографии материала исходного прутка и пробных поковок проводили с увеличением $\times 200$ в поперечном направлении от прокатки, от края к центру сечения образца. В аналогичных точках изучали фактуру проточенной поверхности с увеличением $\times 50$ и измеряли твердость материала по методу Бринелля. Для определения шероховатости и отклонения от цилиндричности проточенных образцов использовали профилограф компании Taylor Hobson.

Исследование влияния оптимизированной структуры полуфабриката на характеристики его обрабатываемости резанием должно позволить сформулировать обоснованные рекомендации на основе комплексного подхода [1], дающие возможность наиболее полно использовать заложенный в материал потенциал достигаемых свойств.

Результаты и их обсуждение. При точении образцов (на диаметр) определены нагрузки на режущий инструмент по координатам X, Y, Z . У исходного прутка указанные нагрузки оказались больше, чем у поковок. Это свидетельствует о более высокой вязкости материала исходного прутка вследствие некоторой рыхлости при существенном размере его зерна.

Ковочные операции измельчают зерно материала заготовки, а также уплотняют его, вследствие чего несколько возрастает его твердость. При обработке резанием существенно улучшается технологичность, в частности, изменяются составляющие силы резания. Значения составляющих силы резания P_x, P_y и P_z при чистовом точении образцов из прутка и поковки приведены на рис. 2, а также в табл. 1, где указаны и их медианные значения.

Установлено, что структура материала прутка соответствует типам 7...8 по девятитипной шкале ВИАМ [9], а структура материала поков-

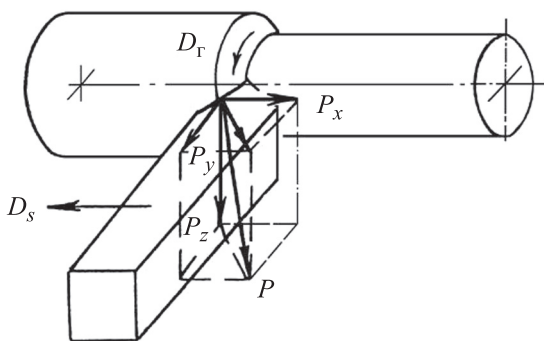


Рис. 1. Схема распределения нагрузок при токарной обработке образца:
 D_r — главное движение вращения; D_s — движение подачи;
 P, P_x, P_y, P_z — сила резания и ее составляющие по осям X, Y, Z соответственно

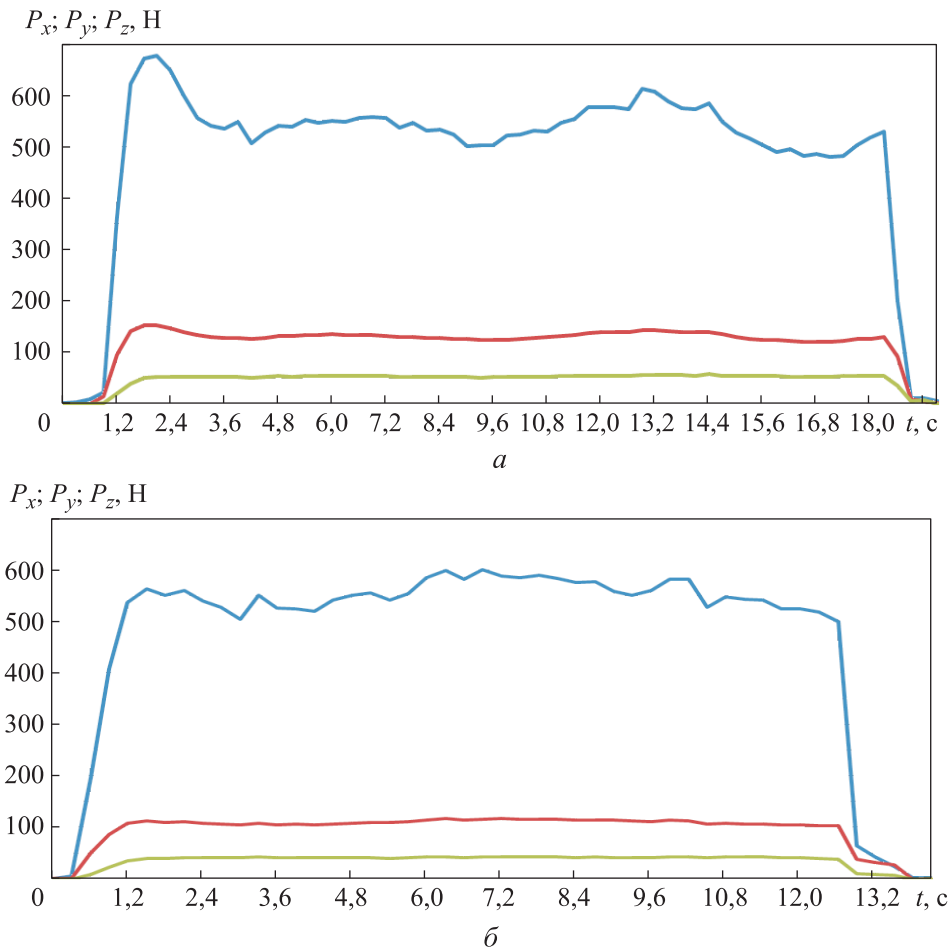


Рис. 2. Зависимости составляющих силы резания P_x (—), P_y (—) и P_z (—) от времени t при чистовом точении образцов из прутка (а) и поковки (б)

Таблица 1

Значения составляющих силы резания при точении образцов из прутка и поковки

Вид образца	Составляющие силы резания (медианное значение), Н		
	P_x	P_y	P_z
Пруток	50 ± 5 (50,3)	120...160 (130,1)	500...670 (560,5)
Поковка	40 ± 5 (40,2)	100...120 (110,1)	500...600 (540,1)

ки — типам 6...7 по той же шкале. Это косвенно свидетельствует о более высокой температуре при прокатке прутка, чем при ковке заготовок. В крупнозернистой структуре прутка присутствуют крупные прослойки фазы α' по границам зерен [10], провоцирующие развитие β -хрупкости.

Можно предположить, что одна из причин появления таких характеристик структур связана с тем, что температуруковки (950...960 °С) назначали исходя из рекомендаций для предварительно деформированных заготовок (прутков), а температуру прокатки — из рекомендаций дляковки слитков [6].

Травление показало рекристаллизованную ($\alpha + \beta$)-структуру [9] материала образцов, что отражено на рис. 3 и 4. Наложение следов токарной обработки на структуру материала образца (см. рис. 3) наглядно демонстрирует улучшение качества поверхности торца кованой заготовки относительно исходного прутка.

Также важно, что в материале исходного прутка имеют место дефекты типа раковин, которые могут быть недопустимы для ряда ответственных деталей. В то же время меньшая температура деформации может обеспечить получение более трещиностойкой и однородной

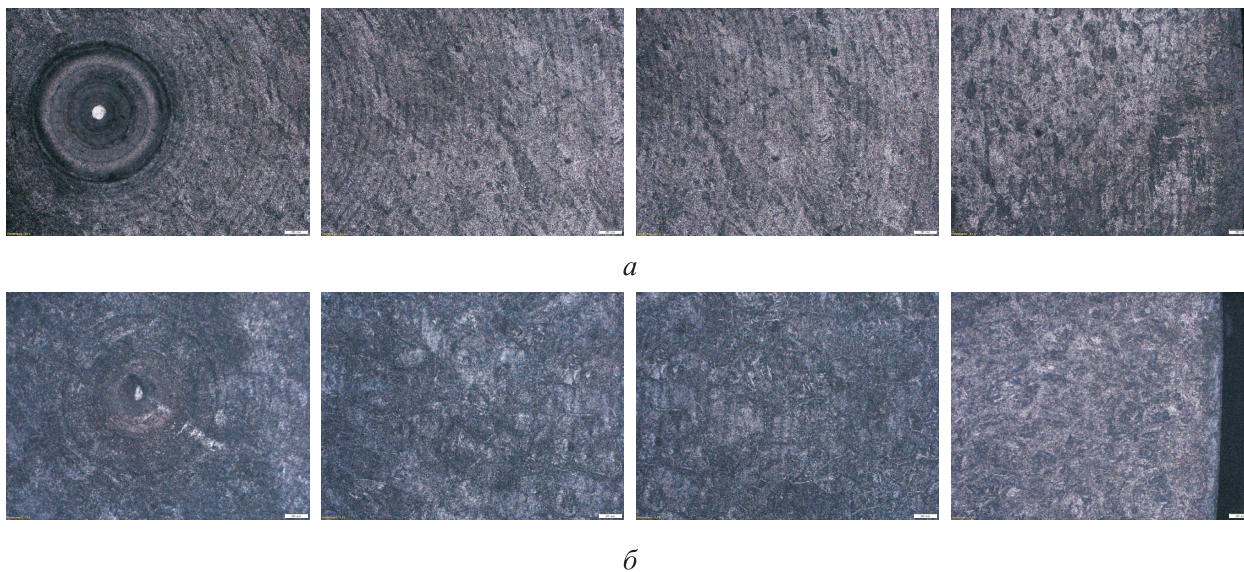


Рис. 3. Микроструктуры обработанных поверхностей исходного прутка (а) и поковки (б) при увеличении $\times 50$

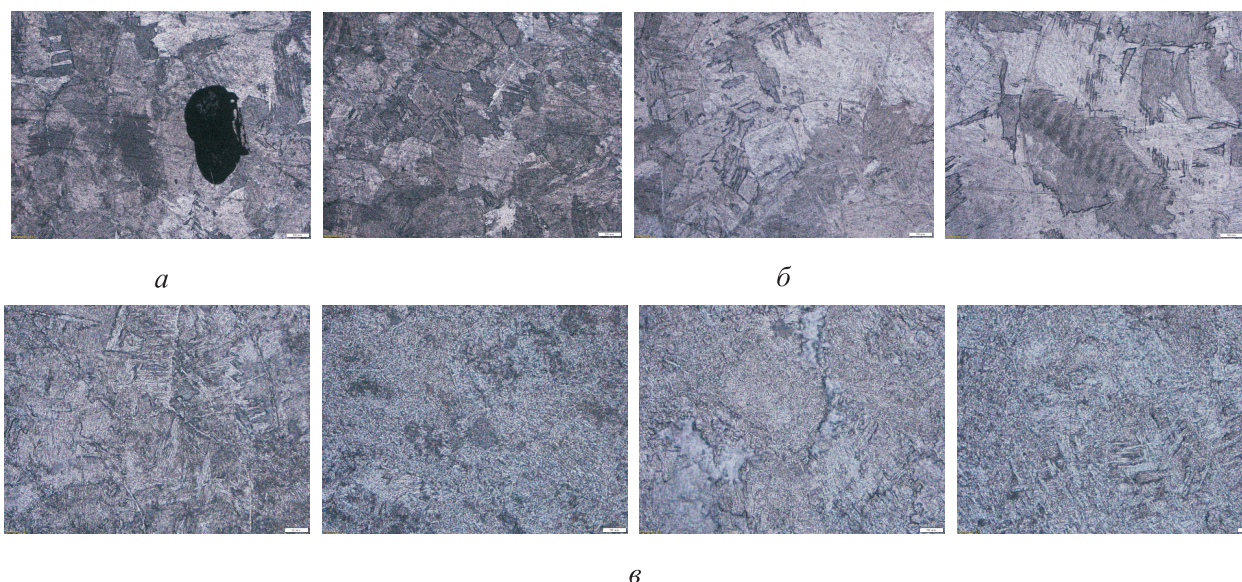


Рис. 4. Крупное зерно и раковина (а) в исходном прутке (а, б) и измельченная структура материала поковки (в) при увеличении $\times 200$

мелкозернистой структуры поковок [10], чем у горячекатаного прутка [3], что и подтверждают исследуемые образцы.

Анализ металлографии образцов показывает, что последовательное перемещение очага деформации в теле поковки при ковке по схеме № 2 ВИАМ [5] позволяет получить в нужной степени равномерно измельченную ($\alpha + \beta$)-структуру [9] материала поковки.

Одновременно профилометрия образцов фиксирует улучшение обрабатываемости кованых заготовок как в снижении нагрузок на инструмент, так и в улучшении качества получае-

мой поверхности и уменьшении отклонения от цилиндричности. Типичные профилограммы шероховатости поверхности образцов из исходного прутка и поковки приведены на рис. 5, круглограммы их отклонения от цилиндричности — на рис. 6.

Таким образом, структура заготовки оказывает непосредственное влияние на ее обрабатываемость, ковка исходного прутка через гармонизацию структуры материала заготовки совершенствует фактуру поверхности получаемой чистовой детали, снижает внутренние напряжения и улучшает ее обрабатываемость.

Твердость металлического материала повышается, шероховатость обработанной поверхности уменьшается и становится более стабильной, сходящая стружка — более однородной и сливной. В результате при одинаковых режимах течения качество получаемых поверхностей существенно различается, что отражает показатель ее шероховатости на рис. 5.

Также обнаружено изменение характера шероховатости проточенных образцов из исходного прутка и поковки. Уплотнение металлического материала в процессековки существенно снижает ширину чередующихся гребней и выемок.

Обработка уплотненного ковкой материала повышенной твердости даже при некотором увеличении абсолютного разброса между вершинами выступов и впадин существенно совершенствует поверхность заготовок, не допуская на ней микровыровы и уменьшая износ инструмента.

Из приведенных на рис. 6 круглограмм, полученных с помощью измерительной машины METRIS LK V10.10.8 немецкого производства, следует, что применениековки в промежуточных технологических операциях снижает овальность чистовой поверхности деталей, созданной в процессе токарной обработки. На рис. 6, а отчетливо видны пики отклонения полученной из прутка заготовки от цилиндрического профиля. Соответственно им в материале распределены и наследственные остаточные напряжения.

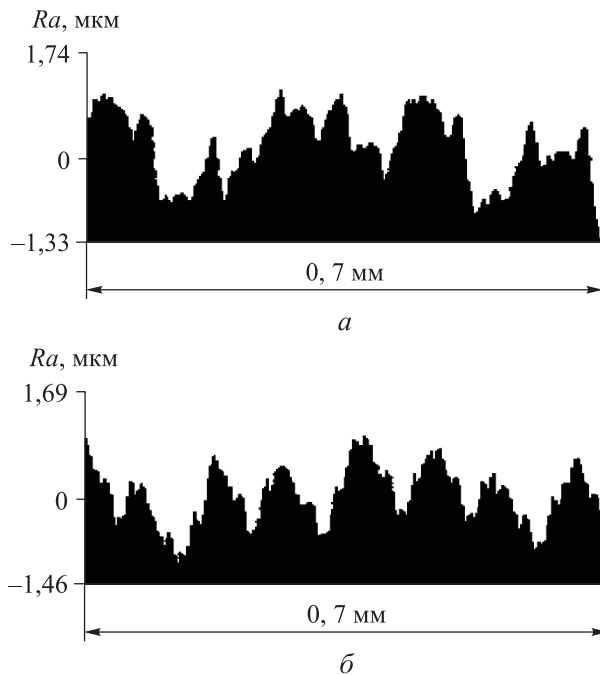


Рис. 5. Профилограммы шероховатости поверхности Ra по образующей образцов из исходного прутка (а) и поковки (б)

Это объясняется тем, что исходные прутки изготавливают, как правило, путем прокатки в сменяющих друг друга трехвалковых клетях прокатных станов, что и обуславливает наличие характерной картины наследуемых остаточных напряжений.

В то же время перемещение очага деформации по телу заготовки при сложной ковке поз-

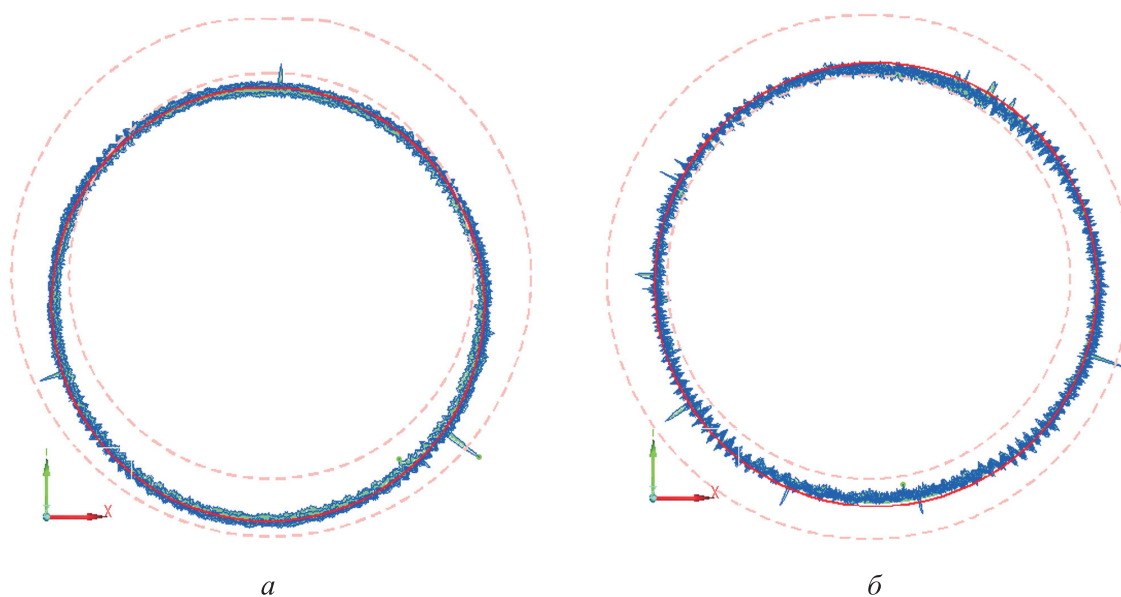


Рис. 6. Круглограммы отклонения от цилиндричности образцов из исходного прутка (а) и поковки (б) после точения

Таблица 2

Полученные характеристики образцов

Вид образца	Твердость, НВ			Геометрические показатели, мкм		
	по центру образца	в центре радиуса образца	на расстоянии 7 мм от края образца	Искривление относительно оси	Отклонение от цилиндричности	Шероховатость поверхности Ra
Пруток	295	440	482	12	33	0,46
Поковка	301	454	530	7	12	0,40

воляет получить более равномерную проработку ее материала, что отражается в появлении множества небольших пиков на круглограмме (рис. 6, б). Это обеспечивает меньший разброс свойств и уровень внутренних напряжений в материале заготовки.

Полученные характеристики (твердость, шероховатость поверхности и стабильность формы материала) образцов из исходного прутка и поковки приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что при точении кованой заготовки помимо снижения нагрузки на режущий инструмент уменьшаются ее отклонение от цилиндричности и шероховатость после обработки. Увеличение твердости материала поковки в соответствии с известной корреляцией [11] свидетельствует о повышении его механических свойств, которое тем существеннее, чем ближе к поверхности полуфабриката проводится замер. Уменьшение искривления образцов относительно их оси также является следствием снижения уровня внутренних напряжений в их материале.

Таким образом, применение кованых заготовок при изготовлении ответственных и точных деталей предпочтительнее отрезаемых от стандартных катаных прутков. Выявленные зависимости не являются характерными только для сплава ВТ6 или вообще титановых сплавов.

Так, исследования, проведенные на прутках и поковках из жаропрочной стали переходного класса 07X16H6-III, показали схожие результаты в части нагрузок на инструмент при точении и шероховатости получаемой поверхности, а также измельчения зерна и повышения твердости материала образцов [12].

Выводы

1. Материал исходных горячекатаных прутков не в полной мере удовлетворяет требованиям к изготовлению ответственных деталей ввиду наличия дефектов и нестабильной структуры. Повышенный уровень наследуемых от процесса прокатки напряжений затрудняет получение точных размеров проточенных заготовок.

2. В материале прутка присутствуют выраженные включения фазы α' по границам зерен, делающие его предрасположенным к развитию β -хрупкости. Всесторонняя ковка повышает однородность и трещиностойкость материала заготовок, обеспечивает получение приемлемых размеров зерна и типов микроструктуры.

3. Вследствие неоднородности металлического материала токарная обработка горячекатаных прутков характеризуется повышенными нагрузками на инструмент и шероховатостью формируемой поверхности. Для получаемого в процессе точения микрорельефа поверхности заготовок характерно образование микровыводов при налипании частиц материала на режущий инструмент.

4. Применение всесторонней ковки является эффективным методом улучшения обрабатываемости заготовок из титанового сплава ВТ6 и повышения качества и стабильности обработанной поверхности, уменьшения его шероховатости и получения сливной стружки. Благодаря последовательному перемещению очага деформации в теле поковки достигается хорошая равномерность свойств ее материала, обеспечивающая меньший уровень внутренних напряжений и хорошую геометрическую точность заготовок после токарной обработки.

Литература

- [1] Иванова В.С. *Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов*. Москва, Наука, 1992. 160 с.
- [2] ОСТ 1.90013-81. *Сплавы титановые. Марки*. Москва, ВИАМ, 1980. 14 с.

- [3] ОСТ 1.90266–86. *Прутки катаные крупногабаритные из титановых сплавов. Технические условия*. Москва, ВИАМ, 1976. 7 с.
- [4] Фомин К.Н., Шилин К.П. Инструкция ВИАМ № 849-67. *Ковка и штамповка деформируемых алюминиевых сплавов на прессах и молотах*. Москва, МАП, 1967. 19 с.
- [5] ПИ 1.2.108–79. *Ковка и штамповка титановых сплавов*. Москва, ВИАМ, 1979. 17 с.
- [6] ПИ № 685-76. *Деформируемые титановые сплавы. Термическая обработка полуфабрикатов и деталей*. Москва, ВИАМ, 1976. 13 с.
- [7] Грановский Г.И., Грановский В.Г. *Резание металлов*. Москва, Высшая школа, 1985. 304 с.
- [8] ОСТ 18878-73. *Резцы токарные проходные прямые с пластинами из твердого сплава. Конструкция и размеры*. Москва, Изд-во стандартов, 2017. 15 с.
- [9] Инструкция ВИАМ № 1054-76. *Металлографический анализ титановых сплавов*. Москва, ВИАМ, МАП, 1976. 14 с.
- [10] Дроздовский Б.А., Проходцева Л.В., Новосильцева Н.И. *Трещиностойкость титановых сплавов*. Москва, Metallurgia, 1983. 192 с.
- [11] Марковец М.П. *О зависимости между твердостью и другими механическими свойствами металлов (обзор). Исследование в области измерения твердости*. Москва-Ленинград, Изд-во стандартов, 1967. 191 с.
- [12] Головкин П.А., Сбруйкина С.В. Обеспечение качественной поверхности чистовых деталей и структуры их материала на этапе разработки технологического процесса горячей деформации стали 07X16H6-III. *Мат. 39-х академических Королевских чтений*. Москва, ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, 2015. С. 230–231.

References

- [1] Ivanova V.S. *Sinergetika. Prochnost' i razrushenie metallicheskih materialov* [Synergetics. Strength and destruction of metal materials]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 160 p. (In Russ.).
- [2] ОСТ 1.90013-81. *Splavy titanovye. Marki* [State standard OST 1.90013-81. Titanium alloys. Grades]. Moscow, VIAM Publ., 1980. 14 p. (In Russ.).
- [3] ОСТ 1.90266-86. *Prutki katanye krupnogabaritnye iz titanovykh splavov. Tekhnicheskie usloviya* [State standard OST 1.90266-86. Large rolled rods made of titanium alloys. Technical conditions]. Moscow, VIAM Publ., 1976. 7 p. (In Russ.).
- [4] Fomin K.N., Shilin K.P. *Instruktsiya VIAM № 849-67. Kovka i shtampovka deformiruemyykh alyuminiyevykh splavov na pressakh i molotakh* [VIAM instruction no. 849-67. Hammering and stamping of aluminum alloys on pressing machines and hammers]. Moscow, MAP Publ., 1967. 19 p. (In Russ.).
- [5] ПИ 1.2.108-79. *Kovka i shtampovka titanovykh splavov* [Working instruction ПИ1.2.108-79. Hammering and stamping of titanium alloys]. Moscow, VIAM Publ., 1979. 17 p. (In Russ.).
- [6] ПИ № 685-76. *Deformiruemye titanovye splavy. Termicheskaya obrabotka polufabrikatov i detaley* [Working instruction ПИ no. 685-76. Deformable titanium alloys. Thermal treatment of half-blanks and parts]. Moscow, VIAM Publ., 1976. 13 p. (In Russ.).
- [7] Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 304 p. (In Russ.).
- [8] ОСТ 18878-73. *Reztsy tokarnye prokhodnye pryamye s platinami iz tverdogo splava. Konstruktsiya i razmery* [State standard OST 18878-73. Carbide-tipped straight bull-nose turning tools. Design and dimensions]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2017. 15 p. (In Russ.).
- [9] Инструкция ВИАМ № 1054-76. *Metallograficheskiy analiz titanovykh splavov* [VIAM instruction no. 1054-76. Metallographic examination of titanium alloys]. Moscow, VIAM Publ., МАП Publ., 1976. 14 p. (In Russ.).
- [10] Drozdovskiy B.A., Prokhodtseva L.V., Novosil'tseva N.I. *Treshchinostoykost' titanovykh splavov* [Crack resistance of titanium alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 192 p. (In Russ.).
- [11] Markovets M.P. *O zavisimosti mezhdru tverdost'yu i drugimi mekhanicheskimi svoystvami metallov (obzor). Issledovanie v oblasti izmereniya tverdosti* [On relation between hardness

and other mechanical parameters of metals (review). Study in field of hardness measurement]. Moscow-Leningrad, Izd-vo standartov Publ., 1967. 191 p. (In Russ.).

- [12] Golovkin P.A., Sbruykina S.V. [Providing quality surface of dimension parts and their material structure at the stage of technical process development of hot deformation of 07Kh16N6-Sh steel]. *Mat. 39-kh akademicheskikh Korolevskikh chteniy* [Proc. 39th Korolev Academic Readings]. Moscow, FGUP GKNPTs im. M.V. Khrunicheva Publ., 2015, pp. 230–231. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.07.2021

Информация об авторах

ГОЛОВКИН Павел Александрович — кандидат технических наук, заместитель главного технолога. АО «Плутон» (105120, Москва, Российская Федерация, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 11, e-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru).

ВОЛКОВ Андрей Валентинович — кандидат технических наук, главный технолог. АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» (107078, Москва, Российская Федерация, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9).

КРЮКОВ Антон Вячеславович — инженер. АО «ЦНИРТИ им. А.И. Берга» (107078, Москва, Российская Федерация, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9, e-mail: minyuc@yandex.ru).

Information about the authors

GOLOVKIN Pavel Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Deputy Chief Technologist. JSC “Pluton” (105120, Moscow, Russian Federation, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya St., Bldg. 11, e-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru).

VOLKOV Andrei Valentinovich — Candidate of Science (Eng.), Chief Technologist. JSC Central Scientific Research Radio Engineering Institute named after Academician A.I. Berg (107078, Moscow, Russian Federation, Novaya Basmanaya St., Bldg. 20, Block 9).

KRYKOV Anton Vyacheslavovich — Engineer. JSC Central Scientific Research Radio Engineering Institute named after Academician A.I. Berg (107078, Moscow, Russian Federation, Novaya Basmanaya St., Bldg. 20, Block 9, e-mail: minyuc@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Головкин П.А., Волков А.В., Крюков А.В. Влияние оптимизированной структуры заготовки из ВТ6 на качество обработанной поверхности при лезвийной обработке. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 12, с. 29–36, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-29-36

Please cite this article in English as:

Golovkin P.A., Volkov A.V., Krykov A.V. Influence of the VT6 Alloy Optimized Structure on the Quality of the Machined Surface During Blade Processing. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 12, pp. 29–36, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-29-36