

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА П-ОБРАЗНЫХ ПОКОВОК ИЗ СПЛАВА ОТ4-1
БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИМЕНЯЕМОЙ ОСНАСТКИ**

П.А. Головкин, к.т.н.

АО «Плутон», 105120, Россия, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 11.

p.golovkin@pluton.msk.ru; тел.: (495) 730-36-19

**IMPROVING THE QUALITY OF “П”-SHAPED FORGINGS MADE OF “OT4-1”
ALLOY WITHOUT CHANGING THE TOOLING USED**

P.A. Golovkin, Ph.D. in Engineering Science

Pluton JSC, 105120, Russia, Moscow, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya st.

p.golovkin@pluton.msk.ru; phone: (495) 730-36-19

Аннотация

Путём математического моделирования и металлографического анализа исследуются возможности повышения качества П-образных поковок из титанового сплава ОТ4-1 при минимальных затратах. Показано, что управление температурой деформации и схемой формообразования являются эффективными и простыми способами повышения качества материала получаемых штампованных поковок.

Ключевые слова: титановый сплав, температура, деформация, материал поковки, трещиностойкость, типы структуры, размеры зерна, ковка, штамповка.

Annotation

By means of mathematical modeling and metallographic analysis, the possibilities of improving the quality of П-shaped (in form of the Russian alphabetic character «П») forgings made of titanium alloy OT4-1 at minimal cost are investigated. It is shown that the control of the deformation temperature and the shaping scheme is an effective and simple way to improve the quality of the material of the resulting stamped forgings.

Keywords: titanium alloy, temperature, deformation, forging material, crack resistance, structure types, grain sizes, forging, stamping.

Общие положения

Высокие значения теплопередачи при относительно низкой теплопроводности [1], определяют склонность к локализации горячих деформационных процессов и крайнюю их неравномерность в заготовках из титановых сплавов. Поэтому кованные, и в особенности, штампованные заготовки часто не соответствуют заданным требованиям в части размера зерна и типа структуры.

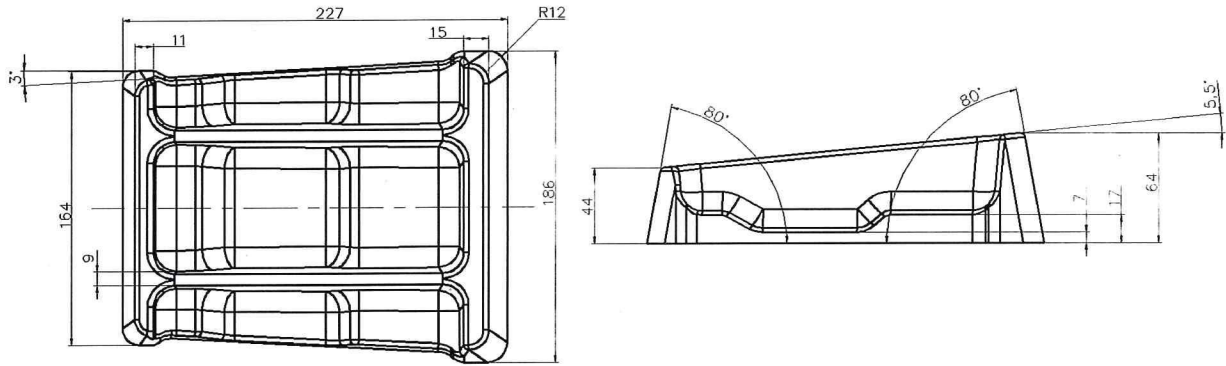


Рис. 1. Общий вид и основные размеры П-образной поковки

Fig. 1. General view and main dimensions of the “П”-shaped forging

Такие способы горячей деформации титановых сплавов, обеспечивающие заданную равномерность свойств материала получаемых заготовок, как изотермическая штамповка, отличаются высокой трудоёмкостью и требуют специального оборудования и сложной оснастки.

Для определения экономичных режимов горячей деформации заготовок из титанового сплава ОТ4-1, на примере типовой П-образной поковки типа кронштейн оценивается применение простых и дешёвых приёмов управления формой заготовки и температурой её деформации, с применением лишь дешёвой открытой одноручьевой штамповой оснастки и универсального штамповочного оборудования.

Вид и основные размеры штампованной поковки типового П-образного кронштейна представлены на рисунке 1. Поковка имеет переменное отношение высоты ребра к толщине полотна H/h , составляющее от 1,6 до 4,3, что делает её типовой. Технологичность получаемой изштампованной поковки чистовой детали кронштейна обеспечивается соответствием её конфигурации требованиям ОСТ 92-9693-91 [2].

Экспериментальная часть

Исследован процесс горячей объёмной штамповки типовых П-образных кронштейнов из среднепрочного псевдо- α сплава ОТ4-1 на гидравлическом аккумуляторном прессе с максимальным усилием 50 МН при скорости перемещения подвижной траверсы в зависимости от величины нагрузки от 50 до 20 мм/с. Отрезаемые от поставляемого по ОСТ 1.90266 [3] исходного прутка заготовки протачивались с шероховатостью не хуже $R_z 3,2$ в размер $\varnothing 90 \times 200$ мм, снимались фаски $5 \times 45^\circ$.

Микроструктура прутков отвечала типам 1...6, размер зерна не превышал балла 6 [3, 4]. Нагрев заготовок до верхнего предела рекомендованной ОСТ 92-1185 [5] температуры (910 °С), производился в открытой газовой печи. Горячая заготовка укладывалась в чистой ручей предварительно разогретого в электрической печи с выкатным подом до 400 °С штампа, разработанного в соответствии с ОСТ 92-3980 [6]. Смазка штампового знака осуществлялась путём укладки стеклоткани и нанесения маслографитовой смеси. Готовые поковки охлаждались не внавал на шамотном полу.

Моделирование производилось с применением построенного на методе конечных элементов программного продукта. Для штамповки на паровоздушном арочном молоте с массой падающих частей 1,0 т. с нагрева до 910 °С использовалась полученная из цилиндрической заготовки Ø 110×135 мм поковка с размерами 60×150×200 мм. Исходя из производственного опыта, в силу стремления понизить разогрев и неравномерность деформационных процессов [7, 8], штамповка осуществлялась с нагрева заготовки до 880 °С, рекомендуемой действующими отраслевыми стандартами как оптимальная [5].

Результаты и их обсуждение

Формообразование штампованной поковки при базовой технологической схеме включает в себя три основные части. Первая – плющение (осадка на плашку) исходной прутковой заготовки, вторая – формирование основной части фигуры поковки, и третья – окончательное оформление её углов и рёбер, при заполнении облойной канавки штампа. Положение заготовки в штампе и распределение накопленных деформаций и температур при её плющении показаны на рисунке 2.

Такая простая схема, однако, имеет несколько недостатков. А именно: при плющении материал заготовки длительное время контактирует с материалом инструмента, при этом быстро охлаждаясь. Большая теплопередача при малой теплопроводности быстро понижает пластические свойства прилегающего к инструменту материала, охрупчивая его и образуя на поверхности заготовки множественные надрывы. Как следствие, деформация быстро локализуется в срединных областях заготовки, вовлекая туда передаваемую усилием пресса энергию, и закладывая предпосылки для образования нежелательной структуры материала. Постепенно заполняя рабочие полости штампа и приближаясь к своей конечной форме, приобретая силовые рёбра будущей детали, одновременно заготовка усугубляет неравномерность характеристик своего материала.

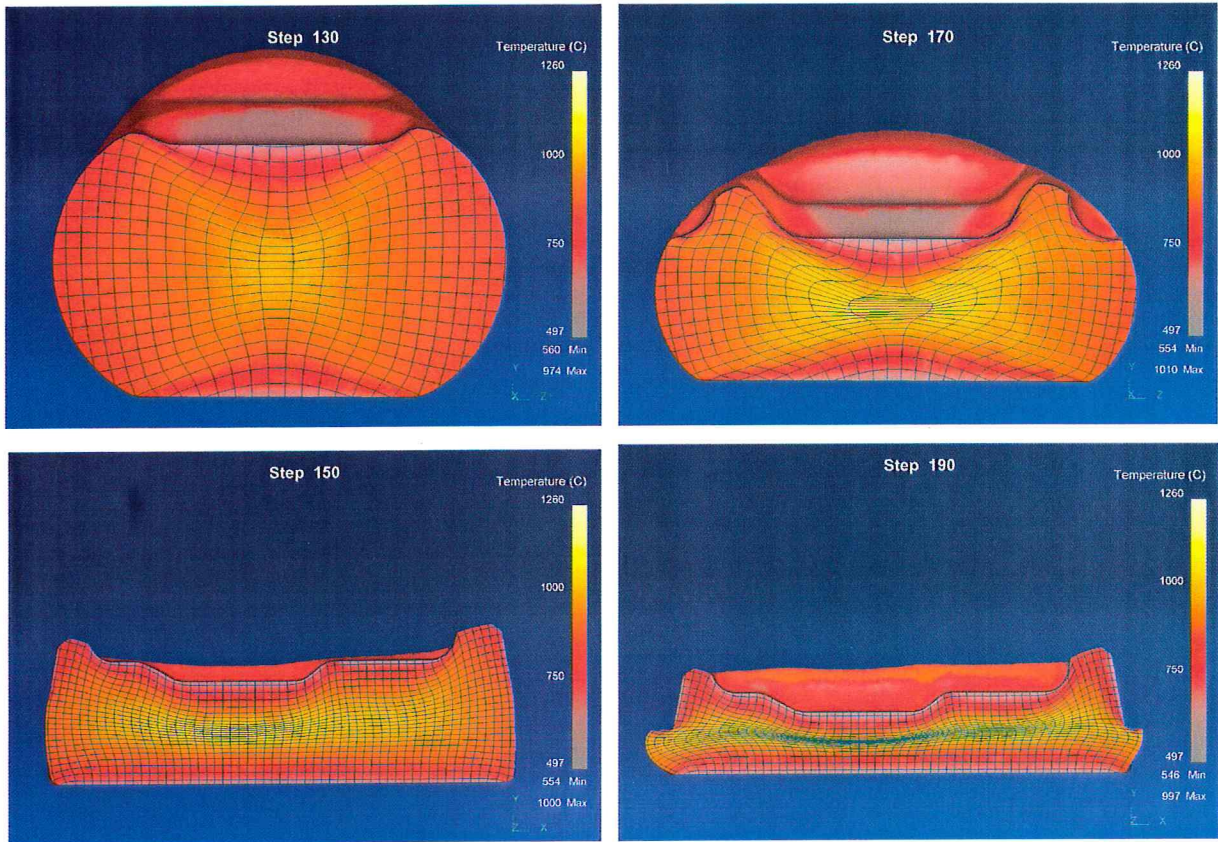


Рис. 2. Накопленные деформации и поля температур при плющении заготовки вначале штамповки в поперечном (вверху) и продольном (внизу) сечениях.
Figure 2. Accumulated deformations and temperature fields during flattening of the billet at the beginning of forging in cross (top) and longitudinal (bottom) sections.

Так, в середине её поперечного сечения зона локализованных деформаций формирует подобную линзе область с высокой температурой и значительными сдвиговыми деформациями. Распределение деформаций и температур в этот период формирования поковки показаны на рисунке 3. На рисунке видно, что линза деформации усугубляется по мере формирования поковки, изменяя её структуру в нежелательном для трещиностойкости направлении. Далее во время заполнения облойных канавок, на фоне резкого роста сопротивления материала деформированию, заполняются уголки рабочего профиля штампа, и поковка приобретает свой законченный вид, как это показано на рисунке 4.

Сведя расчётные данные полей температур по этапам формирования штампованных поволоков в таблицу 1 и сравнив их с распределением полей температур на рисунках 2...4, можно выявить следующее.

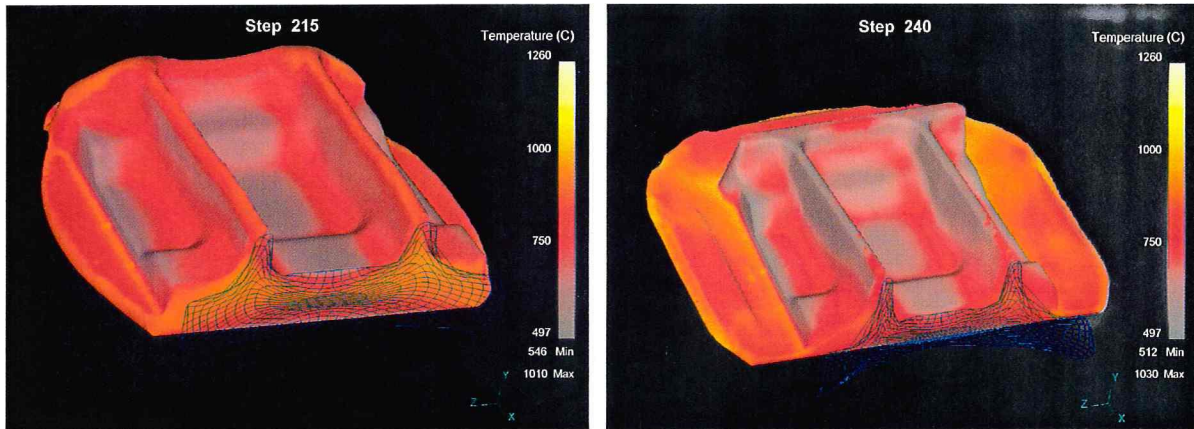


Рис. 3. Распределение накопленных деформаций и полей температур в процессе формирования силовых рёбер поковки.

Fig. 3. Distribution of accumulated deformations and temperature fields during the formation of the forging force ribs.

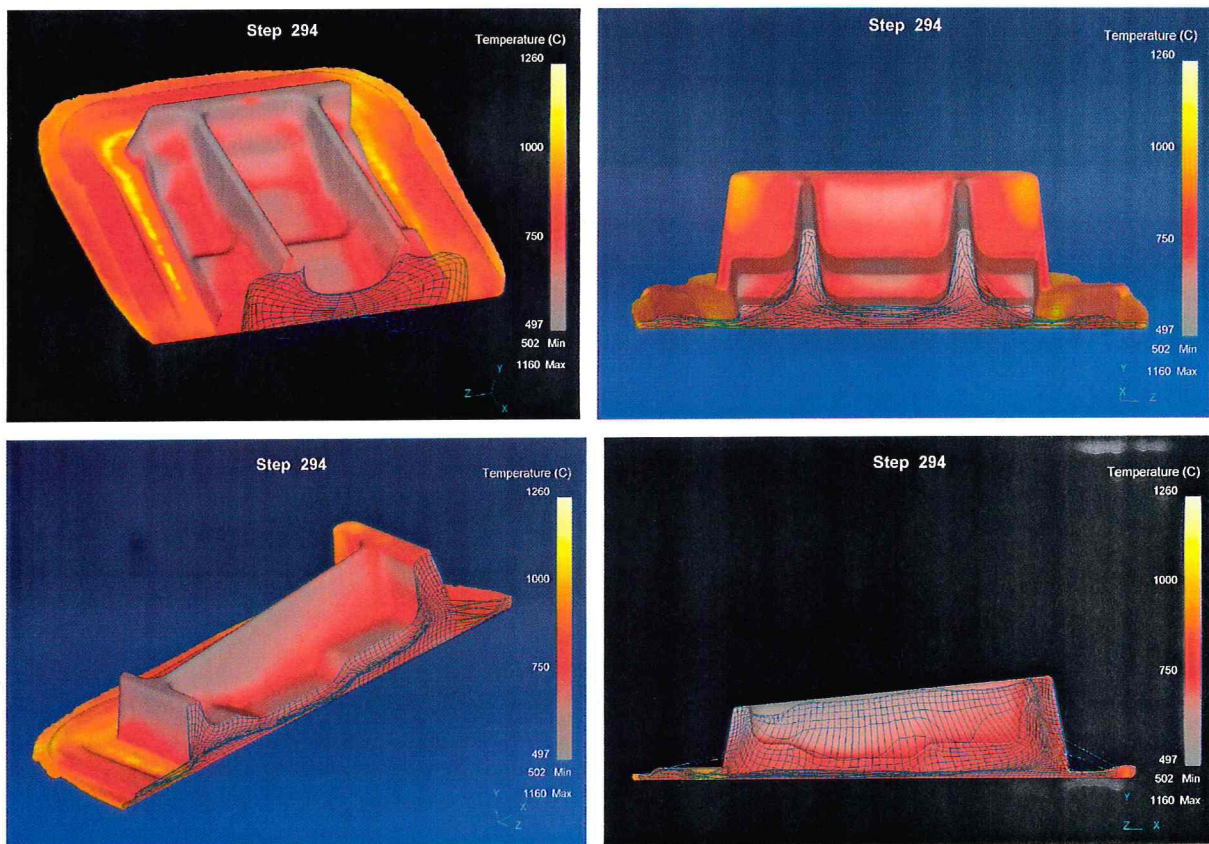


Рис. 4. Распределение накопленных деформаций и полей температур в момент завершения формирования поковки и заполнения облойной канавки.

Fig. 4. Distribution of accumulated deformations and temperature fields at the time of completion of forging formation and filling of the hollow groove.

Таблица 1.

Значения температур в процессе формообразования поковки по шагам

Table 1.

Temperature values in the process of forming forgings in steps

	№ шага	Температура поковки, °С			№ шага	Температура поковки, °С	
		max	min			max	min
Базовая схема, нагрев до 910 °С	130	974	560	Базовая схема, нагрев до 880 °С	130	925	554
	150	1000	554		150	940	549
	170	1010	554		170	952	542
	190	997	546		190	950	535
	215	1010	546		215	960	537
	220	1020	528		220	956	519
	240	1030	512		240	950	507
	260	1147	509		260	1072	503
	294	1160	502		294	1090	498

Вначале превращения заготовки в поковку области локализованных деформаций и наибольших температур совпадают с максимальной по заготовке в целом, то есть воздействуют непосредственно на материал будущей детали. Далее, наибольшие температуры наблюдаются уже в зоне удаляемого облоя, где деформационный разогрев металла уже не так опасен. Оценивая изменяющиеся температуры материала заготовки, важно сравнивать их с промежутком превращения $(\alpha+\beta)\leftrightarrow\beta$, для сплава ОТ4-1 составляющего 900...940 °С [9], когда даже небольшой перегрев переводит деформацию в β - область, ухудшая его трещиностойкость [10].

Из таблицы 1 следует, что использование приближённой к проекции рабочего профиля штампа ковальной заготовки и снижение температуры её нагрева с 910 °С до 880 °С существенно снижает неравномерность распределения полей деформаций и температур. Так, разброс максимальных и минимальных температур снижается с 658 до 607 °С, а их наибольшие значения с 1160 до 1090 °С. Помимо этого, разброс значений накопленной материалом штамповки деформации сократился до 4,07 (1,4...5,7) против 4,64 (1,4...6,5) при базовой технологии. Следует также отметить, что понижение температуры нагрева уменьшает максимальные температуры материала поковки в ходе её оформления довольно резко, в то время как уровень наименьших температур снижается не так заметно. Металлография поволоков также показала, что подъём температуры материала заготовки до 1020...1040 °С при штамповке приводит к несоответствию типов структуры и размера зерна материала заданным требованиям.

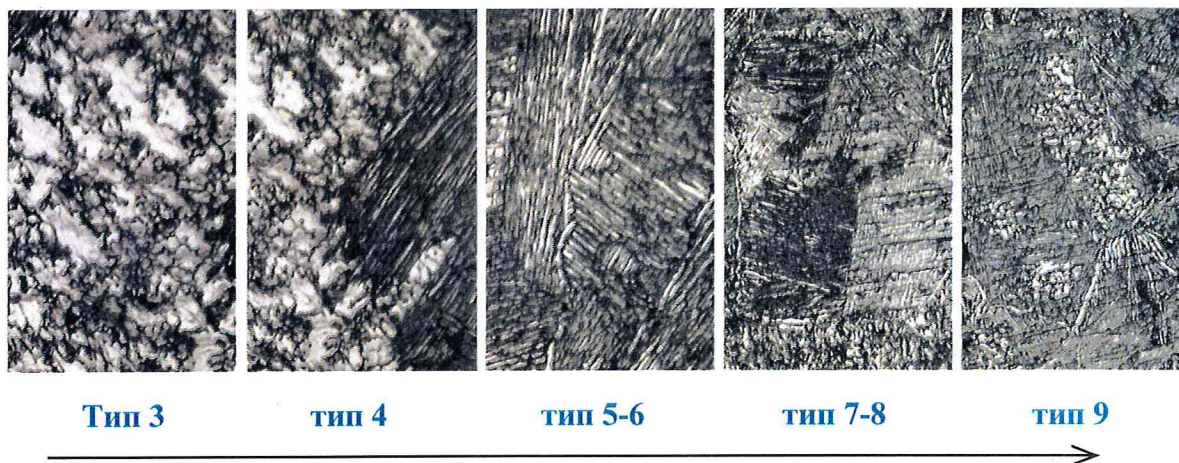


Рис. 5. Смена типов структур материала поковок по мере роста температур.

Увеличение 400[×] (тип 3...6), 250[×] (тип 7...9)

Figure: 5. Changing the types of structures of the material of forgings with increasing temperatures. Magnification 400[×] (type 3 ...6), 250[×] (type 7...9).

Хотя ОСТ 1.90000 [11] не даёт требований к типам структур материала поковок и штамповок из титановых сплавов, ОСТ 1.90266 на исходные прутки устанавливает следующее. У предназначенных к горячей деформации прутков из сплава ОТ4-1 номинальным диаметром ≥ 65 мм, величина зерна не должна превышать балл 8 [4] при диаметре ≤ 100 мм, и балл 9 [4] при диаметре ≥ 100 мм. При этом допускается [3] превышение размера зерна на 1 балл на ≤ 20 % площади макрошлифа, а микроструктура должна соответствовать 1...6 типами стандартной шкалы [4]. Для предназначенных к механической обработке прутков требования по размеру зерна ещё строже – 7 балл для диаметра менее 100 мм, и 8 балл для более толстых прутков [3].

Высокая неравномерность деформационных процессов при изготовлении штамповок, сильно затрудняет выполнение таких требований. Поэтому обычно в КД на поковки и штамповки допускаются структуры 1...6 типов и области с преобладанием 7 типа, если они находятся в зонах удаляемого технологического припуска. Тип 3 шкалы отвечает мелкозернистой, в большей или меньшей степени равноосной структуре, тип 4 – переходной структуре от мелкозернистой к крупнозернистой, типы 5 и 6 – перегретой структуре с умеренной величиной зерна, но при этом грубыми пластинками субструктуры [12]. Типы 7...9 представлены структурами с ещё более крупным зерном и тонкопластинчатой структурой, снижающей характеристики пластичности и трещиностойкости, и потому принятые недопустимыми [4, 12].

Вблизи поверхности материал поковок представлен микроскопической ($\alpha+\beta$)-структурой 4 типа [4] с величиной зерна 3...5 мкм. Далее, если в зонах с допустимой температурой материала структура представлена мартенситным и глобулярным типами с величиной зерна 30...50 мкм (5 тип для сплава ОТ4-1, макроструктура 1 балла [4]), то в зонах деформационного перегрева наблюдается крупнозернистая β - превращённая структура недопустимых [4] 8 и 9 типов при размере зерна 5...7 балла.

Использование прямоугольной в плане кованой заготовки и снижение температуры нагрева, уменьшая неравномерность деформационных процессов и деформационный разогрев, изменяет структуру и свойства материала поковки. Так, пластинчатая структура даёт большую вязкость разрушения, нежели глобулярная, но при этом несколько худшие пластичность и стойкость к развитию усталостных трещин [13]. При этом важно учесть, что разброс значений сопротивления усталости у титановых сплавов значительно больше, чем у сложнелегированных сталей. Так, для отожжённых титановых сплавов корреляция между пределом выносливости и пределом прочности сильно колеблется и составляет $\sigma_{-1}/\sigma_b=(0,47...0,62)$ [13], а значит, тип структуры и размер зерна титановых сплавов сильно влияют на эти их свойства.

Отдельно следует отметить, что максимальный размер зерна в полученной по базовой технологии поковке достигает 2...3 мм, что может пагубно сказаться на способности материала сопротивляться развитию трещин, поскольку превышение температуры деформации приводит к выделению по границам растущих β -зёрен облегчающих рост и продвижение этих трещин прослоек α' - фазы [10]. Образование α' -прослоек облегчается тем, что границы зёрен являются областями с повышенным уровнем напряжений сжатия, а удельный объём α - титана на $\approx 0,17$ % меньше, чем β -титана при 20 °С, и на $\approx 1,5...5$ % меньше при 950...550 °С [1]. Поэтому, хотя содержание β - фазы в псевдо- α сплаве ОТ4-1 относительно невелико, и составляет ≈ 3 % [15], этого достаточно для ухудшения трещиностойкости материала поковки, а значит, этот фактор является важным в балансе фазовых и структурных превращений.

Выводы

1. Приближение размеров и формы заготовки в плане к проекции рабочей части штампа уменьшает локализацию деформационных процессов при формообразовании штампованной поковки, вследствие чего уменьшается неравномерность температурных полей в металлическом материале и снижается его деформационный разогрев. При этом применение специальных видов оборудования и изменение оснастки не требуется.

2. Изменение формы заготовок и снижение температуры их нагрева с 910 °С до 880 °С, то есть всего на 30 °С, позволяет снизить максимальную температуру деформируемого материала примерно на 70 °С, то есть за счёт уменьшения неравномерности деформационных процессов даёт кумулятивный эффект.

3. Ограничение деформационного разогрева материала поковки из сплава ОТ4-1 в пределах не более 1020 °С позволяет удержать его от образования недопустимых типов структур и избыточного размера зерна, как следствие – от выделения прослоек α' - фазы по границам растущих β -зёрен и вызываемой ими β - хрупкости.

Список источников

1. Г.И. Носова / Фазовые превращения в сплавах титана / –М.: «Металлургия», 1968, -180 с.
2. ОСТ 92-9693-91 Детали, изготавливаемые методом горячей объёмной штамповки. Общие требования технологичности конструкции / –М.: ОНТИ-2, 1992. -34 с.;
3. ОСТ 1.90266-86 / Прутки катаные крупногабаритные из титановых сплавов. Технические условия / –М.: ВИАМ, 1988. -10 с.
4. Металлографический анализ титановых сплавов: ПИ № 1054-76 / –М.: ВИАМ, 1976. -14 с.
5. ОСТ 92-1185-78 / Штамповки и поковки из титановых сплавов. Типовые технологические процессы: / –М.: ОНТИ-2, ВИАМ, 1979. -40 с.
6. ОСТ 92-3980-76 Штампы на молоты, прессы, горизонтально-ковочные машины. Расчёт и конструирование / –М.: ОНТИ-2, 1977. -76 с.
7. Галкин В.И., Головкин П.А., Фесенко С.А., Давыдкина Е.А. / О повышении качества поковок Ш-образных кронштейнов из сплава ВТ14 / –М.: Титан, № 2, 2021. С. 40...44.
8. Галкин В.И., Головкин П.А., Фесенко С.А. / Совершенствование процесса горячей объёмной штамповки П- образных поковок из сплавов ВТ14 и ВТ23 / –М.: Заготовительные производства в машиностроении, 2020, № 11, с. 52...55.
9. Деформируемые титановые сплавы. Термическая обработка полуфабрикатов и деталей: ПИ № 685-76 / Взамен ПИ № 685-69 с 10.05.1976 / –М.: ВИАМ, 1976. -13 с.
10. Б.А. Дроздовский. Л.В. Проходцева, Н.И. Новосильцева / Трещиностойкость титановых сплавов / –М.: Metallurgia, 1983. -192 с.
11. ОСТ 1.90000-70 / Штамповки и поковки из титановых сплавов / –М.: ВИАМ, 1970. -10 с.

12. Е.А. Борисова, Г.А. Бочвар, М.Я. Брун, др. / Металлография титановых сплавов под ред. Н.Ф. Аношкина / –М.: Металлургия, 1980. -464 с.

13. Б.А. Колачев, И.С. Полькин, В.Д. Талалаев / Титановые сплавы разных стран / Справочник / –М.: ВИЛС, 2000. -316 с.

14. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения: ГОСТ 23207-78 / –М.: Издательство стандартов, 1978, -48 с.

15. Ю.Д. Хесин, С.М. Шулькин / Пластическая деформация и термическая обработка некоторых двухфазных сплавов титана / Металловедение. Сборник статей № 2. –Л.: Судпромгиз, 1958. -268 с.: ил. -С. 251...265.