

УДК 621.73

Исследование особенностей процессаковки прутков из сплава на основе железа и никеля

Смирнов Максим Олегович

smirnov_mo@mail.ru

Солнцев Михаил Александрович

Лазаренко Никита Константинович

АО «СМК», Ступино, Россия

Аннотация. Проведена ковка опытной партии слитков из нового железоникелевого сплава ВЖ718 в пруток. Выполнены испытания свойств, структурных характеристик и ультразвуковой контроль кованных прутков. Исследованы и определены причины формирования разнотерности кованных прутков. Предложены корректировки технологического процессаковки, обеспечивающие формирование равномерного мелкого зерна по всему сечению прутка.

Ключевые слова: пластическая деформация, ковка, жаропрочный железоникелевый сплав, механические свойства, структура

Investigation of the features of the forging process of bars from an alloy based on iron and nickel

Smirnov Maksim Olegovich

smirnov_mo@mail.ru

Solntsev Mikhail Alexandrovich

Lazarenko Nikita Konstantinovich

JSC SMK, Stupino, Russia

Abstract. A pilot batch of ingots from the new iron–nickel alloy VZh718 was forged into a bar. Tests of properties, structural characteristics and ultrasonic testing of forged rods were performed. The causes of the formation of grain size differences in forged rods were investigated and determined. Adjustments to the forging process were proposed to ensure the formation of uniform fine grain across the entire bar cross-section.

Keywords: plastic deformation, forging, heat-resistant iron-nickel alloy, mechanical characteristic, structure

Введение. Новый жаростойкий и жаропрочный сплав на железоникелевой основе ВЖ718 применяется для заготовок деталей газотурбинных двигателей (ГТД), длительно работающих при температурах 500–700 °С.

Сплав легирован алюминием (Al) и титаном (Ti), которые являются основными элементами, определяющими формирование упрочняющей γ' -фазы ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$). Температура растворения γ' -фазы находится в диапазоне 900–1050 °С. В качестве стабилизаторов ГЦК γ -матрицы введен молибден (Mo), углерод (C) и титан (Ti). В сплаве содержится около 5 % ниобия (Nb), что да-

ет возможность образовывать как упрочняющую γ'' -фазу, так и δ -фазу. Обе фазы представляют собой соединение $\text{Ni}_3(\text{Nb})$, δ -фаза — устойчивая фаза, в которую превращается метастабильная γ'' -фаза при определенных условиях обработки. Пластины δ -фазы микронного размера ограничивают рост зерен и повышают устойчивость к ползучести [1–3]. Данная фаза образуется либо перед ковкой слитка, либо во время отпуска на твердый раствор при температуре ниже δ -сольвуса. Согласно данным различных исследований сплавов типа Inconel 718 выделение δ -фазы наиболее выражено в температурном диапазоне 926–954 °C, а температура растворения обычно составляет порядка 982 °C [4].

Для обеспечения оптимальных усталостных свойств деталей турбин из железоникелевых сплавов, как правило, требуется получить средний размер зерна, соответствующий шкале ASTM 10 [5]. Обеспечение данного параметра в штампованной заготовке, используемой под изготовление детали возможно при формировании размера зерна в исходном ковном прутке $\geq G7$.

Целью данной работы является изучение структуры и свойств кованных прутков из нового железоникелевого сплава ВЖ718 и разработка рекомендаций по повышению данных показателей.

Материалы и методы; **Результаты.** Деформация слитка в прутки осуществлялась на прессах усилием 40 МН (ковка) и 100 МН (осадка), нагрев выполнен в промышленных газовых печах. Термическая обработка заготовок под образцы проводится в лабораторных электрических печах по указанному в нормативной документации режиму закалки с последующим старением. Испытания на растяжение для определения механических свойств проводились по ГОСТ 1497–84 на машине для испытания конструкционных материалов УТС 101. Испытания на длительную прочность выполнены по ГОСТ 10145. Оценка макро- и микроструктуры проводилась по ГОСТ 5639. При металлографических исследованиях использовали микроскоп К. Zeiss Axiovert 40 MAT, а также анализатор изображений Thixomet.

В качестве исходной заготовки использован механически обработанный слиток диаметром 480 мм. Деформация проведена с использованием плоских (осадка) и фасонных бойков (ковка). Первая исследованная схема деформации слитка в прутки заключается в обеспечении укова не менее 6,0. Технология спроектирована таким образом, чтобы первые переходы деформации осуществлялись выше температуры полного растворения γ' -фазы ($T_{\text{пр}}$), окончательные — ниже температуры $T_{\text{пр}}$ и ниже температуры δ -сольвуса.

Основными параметрами, определяющими качество кованных прутков из сплава ВЖ718 являются:

механические свойства при комнатной температуре и 650 °C на термически обработанных образцах;

- длительная прочность при температуре 650 °C на термически обработанных образцах;
- 100%-ный ультразвуковой контроль с чувствительностью 0,8 мм;
- микроструктура на поперечном темплете;

– микроструктура на двух термически обработанных микрошлифах, вырезанных в продольном направлении на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса и в центре прутка.

Отсутствие эхо-сигналов при проведении УЗК при контроле с диаметром отражателя 0,8 мм является показателем бездефектной и однородной структуры. Наличие полосчатой дельта фазы приводит к формированию крупного зерна между полосами и может быть зафиксировано при УЗК с указанной чувствительностью, что проявляется в виде структурных шумов при контроле.

Результаты исследования кованных прутков представлены в таблице.

Механические свойства и параметры структуры прутков

Номер плавки	Температура испытания, °С	Кратковременная прочность				Длительная прочность		Микроструктура
		Временное сопротивление σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение Ψ , %	Время до разрушения, ч	Относительное удлинение δ , %	Балл зерна
1-B7	20	1381	1161	20	34	–	–	В центре — ASTM № 8, единичные ASTM № 6,0; ASTM № 5,0. На $\frac{1}{2}$ радиуса — ASTM № 9, единичные ASTM № 6,0; ASTM № 5,5
		1376	1159	20	38	–	–	
	650	1120	976	17	31	45–29	2,4	
		1114	960	23	35	84–55	13,2	
Требования	20	≥ 1275	≥ 1035	≥ 12	≥ 15	–	–	–
	650	≥ 1000	≥ 860	≥ 12	≥ 15	≥ 25	≥ 5	–

Результаты ультразвукового контроля прутков свидетельствуют о значительных структурных шумах в центральных слоях металла. Разрезка и последующие металлографические исследования данных зон свидетельствуют о наличии значительной разнотерности (рис. 1).

Исходя из полученных результатов исследования макро- и микроструктуры, следует вывод о том, что степень деформации в процессековки по первой схеме, не обеспечивает необходимого измельчения зерна по сечению прутка.

На фотографии макроструктуры в поперечном сечении прутка отчетливо видно наличие центральной зоны с крупнозернистой структурой металла.

Не до конца проработанная сердцевина прутка, содержащая остатки дендритной структуры исходного слитка, приводит к снижению уровня механических свойств и структурных характеристик материала.

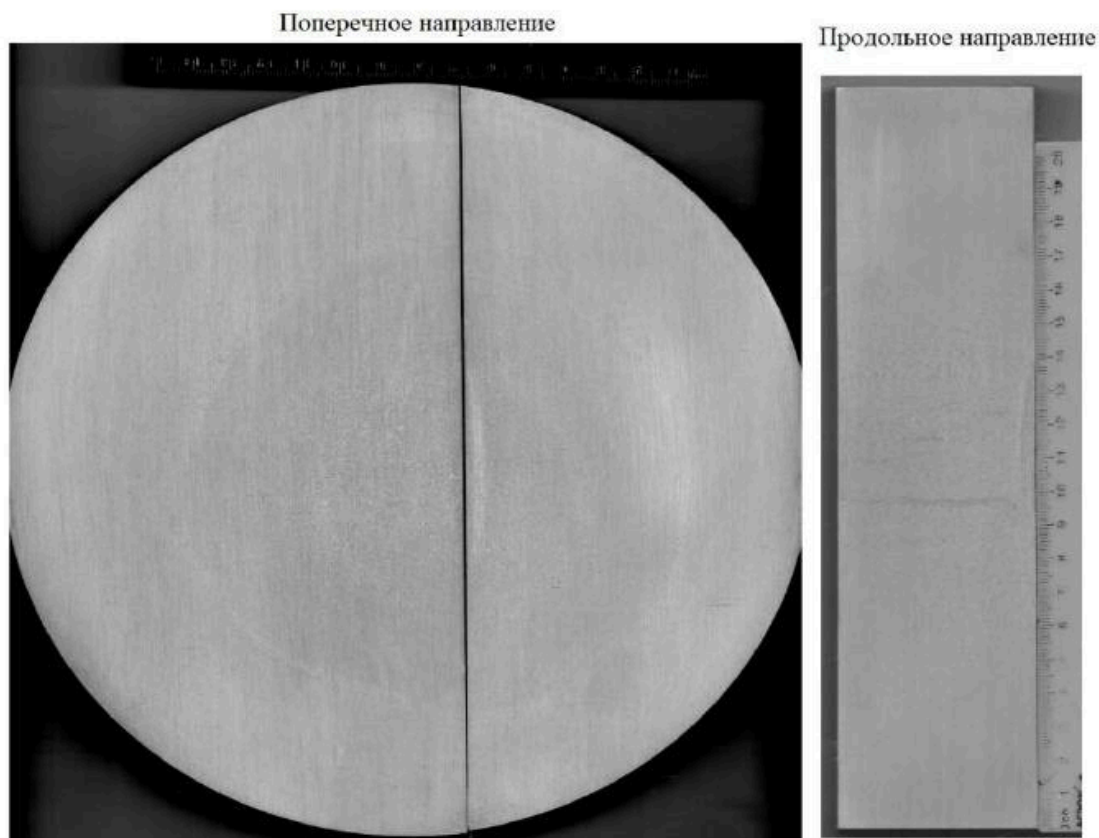


Рис. 1. Фотография макроструктуры различных прутков

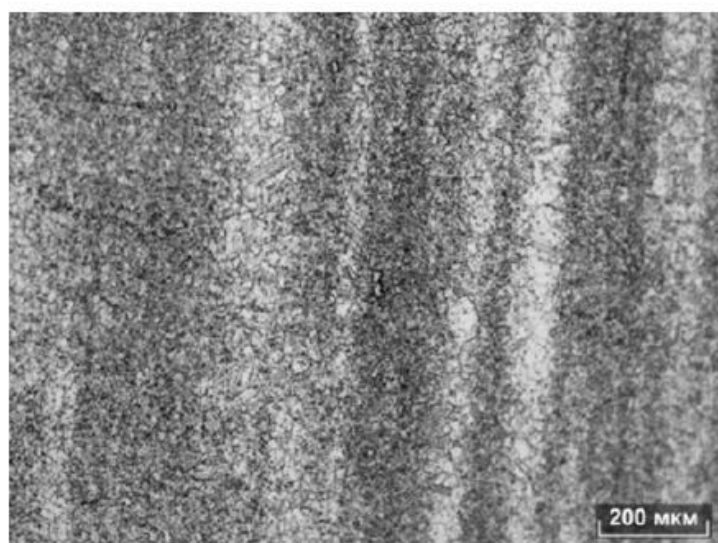


Рис. 2. Фотография микроструктуры прутка, изготовленного по первой технологии при увеличении $\times 100$

Данная разнотернистость может быть обусловлена следующими основными факторами.

- Недостаточное проникновение деформации в центральные слои металла (недостаточная степень деформации для измельчения зерен).
- Высокая температураковки (чрезмерно интенсивное протекание процессов собирательной рекристаллизации при промежуточных нагревах и подгревах).
- Неравномерное распределение выделений δ -фазы.

При этом последующие результаты исследования штампованных заготовок, изготовленных из данных прутков, показали, что данная структурная полосчатость и разнотернистость сохраняются в готовом изделии. Подобную структуру сплава ВЖ718 не удалось исправить как деформацией в штампах, так и путем изменения режимов термической обработки. По результатам исследований штампованных заготовок из данных прутков определено, что в ряде зон заготовок сохраняется структурная полосчатость с размером зерна $G \leq 7$ (рис. 3).

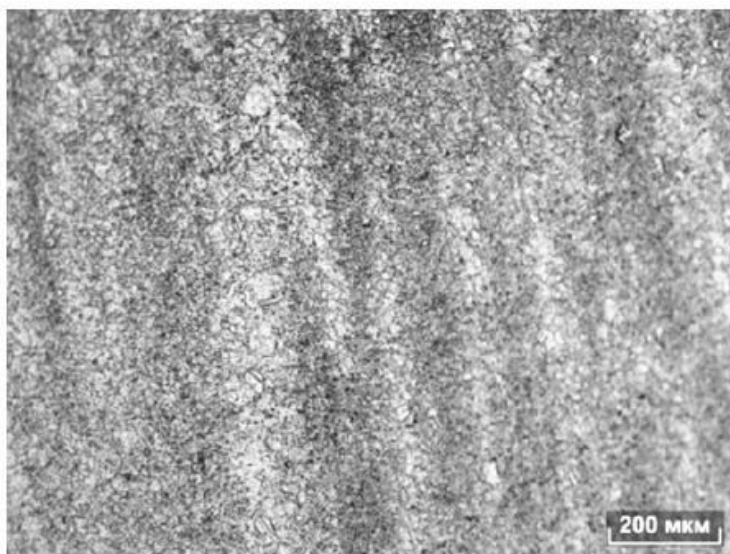


Рис. 3. Фотография микроструктуры одной из зон штампованной заготовки, изготовленной из прутка, полученного по первой технологии при увеличении $\times 100$

Также унаследованная разнотернистость привела к понижению уровня свойств по наиболее важному показателю свойств МЦУ на штампованных заготовках, характеризующему эксплуатационную надежность и ресурс готовых деталей. Фрактографические исследования испытанных образцов подтвердили, что очаг разрушения зарождается от границы крупного зерна. Определено, что для исключения несоответствий при испытаниях МЦУ штампованных заготовок необходимо обеспечить равномерное и более мелкое зерно в кованом прутке.

Обсуждение полученных результатов. Исходя из полученных результатов исследования макро- и микроструктуры, следует вывод о том, что сте-

пень деформации в процессековки по примененной схеме, не обеспечивает необходимого измельчения зерна по сечению прутка. Не до конца проработанная дендритная структура исходного слитка, приводит к снижению уровня механических свойств и структурных характеристик материала.

Значительная разнотернистость на микроуровне, балл зерна изменяется от G8 на периферии до G5 в центре прутков по шкале ASTM. При этом имеется разброс значений преобладающего размера зерна между прутками различных плавок, что подтверждает чувствительность сплава ВЖ718 к любым, даже незначительным отклонениям от стационарного термдеформационного режима.

Формирование полосчатой структуры приводит к чрезмерному понижению значений МЦУ. Исправить данную структуру при последующих операциях не представляется возможным.

Заклучение. Необходимо рассмотреть возможность применения дополнительных осадков, что позволит увеличить степень деформации в центральных зонах прутка. Дополнительно возможно опробовать понижение температуры деформации на последних проходах, что, в свою очередь, может обеспечить понижение интенсивности протекания рекристаллизационных процессов.

Список источников

- [1] Anderson M., Thielin A.L., Bridier F., Bocher P., Savoie J. δ -Phase precipitation in Inconel 718 and associated mechanical properties. Mater. Sci. Eng., 2017, vol. 679, pp. 48–55.
- [2] Andersson J., Sjoberg G.P., Viskari L., Chaturvedi M.C. Effect of solution heat treatments on superalloys Part 1 — alloy 718, Mater. Sci. Technol., 2012, vol. 28, pp. 609–619.
- [3] Donachie M., Donachie S. Superalloys: a technical guide. Materials Park, ASM international, 2002, 409 p.
- [4] Desvallees Y., Bouzidi M., Bois F., Beaude N. Delta phase in Inconel 718: mechanical properties and forging process requirements. The Minerals, Metals & Material Society, 1994, pp. 281–291. https://doi.org/10.7449/1994/SUPERALLOYS_1994_281_291
- [5] Theska F., Stanojevic A., Oberwinkler B., Ringer S.P., Primig S. On conventional versus direct ageing of Alloy 718. Acta Materialia, 2018, vol. 156, pp. 116–124.