

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ НАГРІВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЕФОРМОВАНОГО СПЛАВУ ЭИ 828-ВД

Исследовано влияние скорости нагрева на структуру и механические свойства сложнoleгированного высокопрочного сплава ЭИ 828-ВД после деформации с суммарными обжатиями от 10 до 75%. Структуру оценивали методами металлографии и электронной микроскопии на фольгах. Нагрев осуществляли двумя способами: электроконтактным со скоростями от 30 до 160 К/с и ускоренным печным со скоростью около 15 К/с.

Установлено, что структурные состояния, формирующиеся в процессе отжига деформированных сплавов в области температур 900-1200°C, а также соответствующие им механические свойства, зависят не столько от скорости нагрева, сколько от типа нагрева, при этом характеристики пластичности в случае печного нагрева существенно ниже, чем для скоростного.

Высказывается предположение, что смена механизма разупрочнения в условиях скоростного нагрева по сравнению с печным, позволяет формировать структурные состояния γ - и γ' -фаз, обеспечивающие достаточно высокую пластичность сплава в двухфазном состоянии.

The following research determined: the influence of the heating rate on the structure and mechanical properties of the complex-alloy high-ЭИ 828-ВД revealed deformation with overall reduction from 10 to 75%. The structure was evaluated using metallographic methods and electron microscopy on foils. Heating was carried out in two ways: electro contact with speeds from 30 to 160 K / sec and accelerated oven at about 15 K / sec.

It was established that the structural state formed during annealing of deformed alloys in the temperature range 900-1200 ° C, and the corresponding mechanical properties, depend not so much on the speed of heating, but on the type of heating, and the characteristics of plasticity in case of furnace heating were much lower than that of rapid heating.

It is suggested that the change in the mechanism of softening during the rapid heating compared to the furnace heating allows to form the structural condition of γ -and γ' -phases, which provides a sufficiently high plasticity of the alloy in a two-phase state.

Процес холодного волочіння з проміжними відпалами, які зменшували ступінь зміцнення складнолегованого високоміцного сплаву на нікелевій основі ЭИ 828-ВД, на практиці часто призводить до появи тріщин. Труднощі деформування пов'язані, головним чином, з неможливістю досягнення в цьому матеріалі однофазного стану.

З досить нечисленних літературних джерел, що стосуються цього матеріалу, відомо [1, 2], що зафіксувати високотемпературний однофазний γ -стан у ньому неможливо навіть шляхом різкого гартування: у процесі охолодження йде розпад, сплав завжди містить часточки γ' -фази. У роботах В.М. Гриднева із співробітниками [3, 4], виконаних на модельних старіючих сплавах систем Ni-Al та Ni-Cr-Al, повідомляється про можливість одержання метастабільного однофазного стану у випадку застосування швидкісної електротермічної обробки. Авторами встановлено, що на відміну від відомих раніше механізмів розчинення і повторного гомогенного виділення γ' -часточок за границями зерен, що рухаються у процесі рекристалізації старіючих сплавів, при швидкісному нагріванні можливо до моменту завершення первинної рекристалізації одержати однофазний стан і при цьому повторне виділення γ' -часточок не встигає відбутися, а однофазний стан, на відміну від звичайного гартування, вдається зберегти до кімнатної температури.

У представлений роботі досліджено вплив швидкості нагрівання на структуру і механічні властивості дроту зі сплаву ЭИ 828-ВД. Дослідження проводилося на зразках діаметром 2,0 мм, які були продеформовані зі ступенями деформації від 10 до 75%. Нагрів зразків до різних температур з наступним охолодженням на повітрі здійснювався двома способами: 1) електроконтактний нагрів із швидкостями від 30 до 160 К/с; 2) прискорений пічний нагрів, $V_H = 15$ К/с. Витримка після досягнення заданої температури в обох випадках складала 60 сек.

Аналіз структурного стану, що формується в процесі відпалу у деформованих сплавах в області температур 900-1200°C, а також результати механічних випробувань свідчать про істотну відмінність цих характеристик не стільки від швидкості нагріву, скільки від типу нагрівання. Як приклад на рис.1 показано вплив температури відпалу і способу нагріву на мікроструктуру сплаву, попередньо продеформованного із сумарним обтисненням 40%. Як видно з порівняння рис.1 б,в,г і рис.1 д,е,ж структури, що формуються у сплавах в умовах швидкісного нагріву, істотно відрізняються від таких для пічного нагріву, хоча швидкості нагрівання при цьому практично не відрізняються ($V_{п.н.} = 15$ К/с, $V_{ш.н.} = 50$ К/с). У той же час експериментальні дані показують, що зміна швидкості нагріву від 30 до 160 К/с у процесі електроконтактного нагрівання ні до яких змін у структурі не призводить.

Результати механічних випробувань для зразків, продеформованих із сумарними обтисненнями 20, 50 і 75 % і підданих знеміцнюючому відпалу у різних умовах представлено у таблицях 1 і 2, а також частково на рис.2, де пунктирними лініями показано зміну σ_b та δ_p для пічного нагріву, суцільними – для електроконтактного. Аналіз

результатів механічних випробовувань показує, що якщо величини границь міцності і текучості мало відрізняються між собою для різних способів нагрівання, а при 1200 °С у випадку пічного відпалу ці значення завжди дещо нижчі, ніж для швидкісного, то відносне рівномірне подовження δ_p і рівномірне звуження ψ_p у випадку пічного нагрівання істотно гірші, ніж для швидкісного.

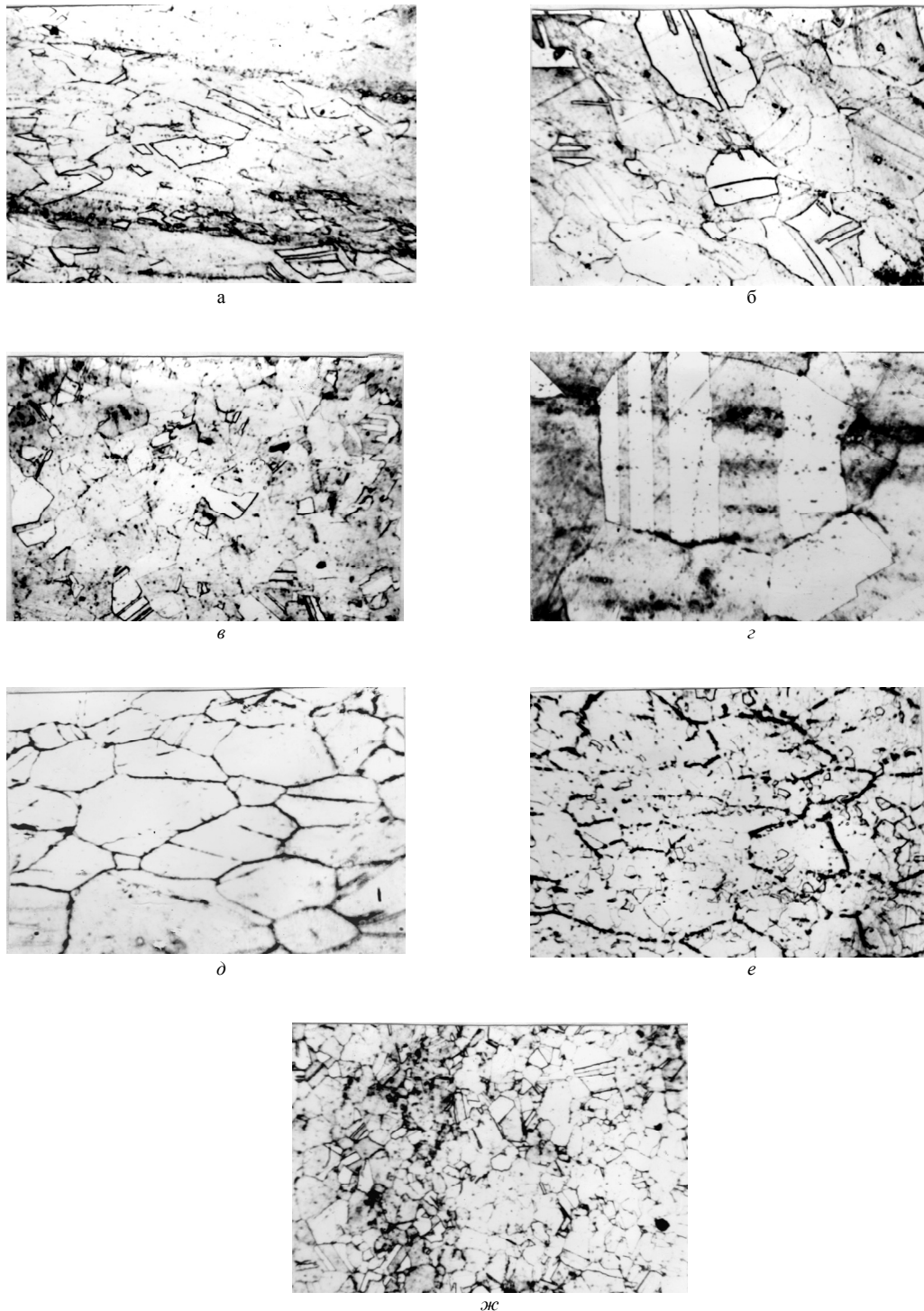


Рис. 1. Вплив температури відпалу та способу нагріву на мікроструктуру сплаву ЕИ 828-ВД після 40 % деформації, $\times 180$.
a-деформований стан; *b*, *v*, *z* – прискорений пічний нагрів, $V_n = 15-20$ К/с; *d*, *e*, *ж* - електроконтактний нагрів, $V_n = 50$ К/с;
b, *d* – температура відпалу 1000 °С; *v* – температура відпалу 1100 °С; *z* – температура відпалу 1200 °С; *e* – температура відпалу 1070 °С; *ж* – температура відпалу 1180 °С

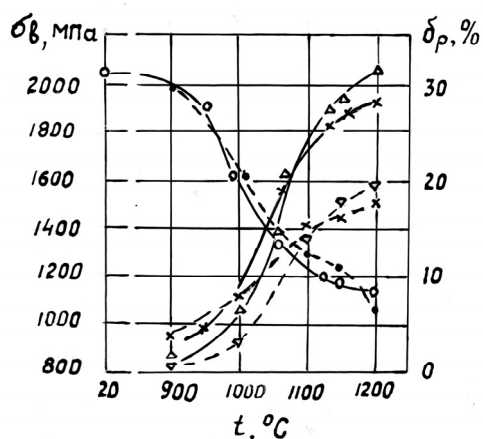


Рис. 2. Вплив ступеня деформації, температури відпалу та способу нагріву на зміну межі міцності σ_B та відносного рівномірного подовження δ_p сплаву ЕІ 828-ВД

--- піchnий нагрів; — електроконтактний нагрів; ○, ● - σ_B ($\epsilon = 20\%$); × - δ_p ($\epsilon = 20\%$); Δ - δ_p ($\epsilon = 50\%$).

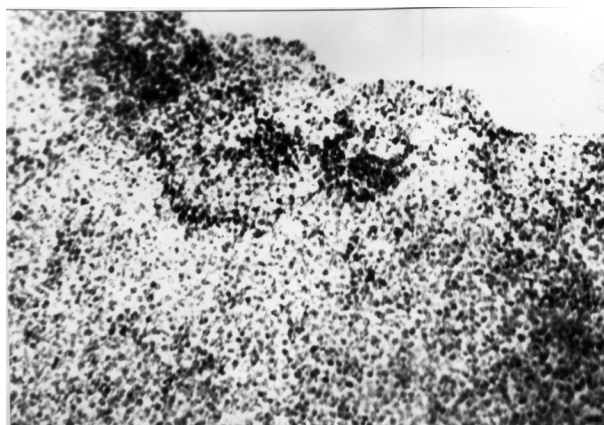


Рис. 3. Мікроструктура сплаву ЕІ 828-ВД, підданого електроконтактному нагріву до 1180 °С ($V_H = 50$ К/с) після 40% деформації

Також встановлено, що зміна швидкості нагрівання від 30 до 160 К/с при електроконтактному способі не впливає на величини механічних характеристик.

Електронномікроскопічне дослідження зразків, підданих швидкісному нагріву, показало, що в сплаві у рекристалізованому стані присутня γ' -фаза у кількості, що відповідає рівноважному стану (не менше 33 об. %).

Таблиця 1

Вплив ступеня деформації та температури відпалу на механічні властивості дроту зі сплаву ЕІ 828-ВД (електроконтактне нагрівання, $V_H = 30 \dots 160$ К/с)

Стан зразка	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ_p , %			ψ_p , %		
	$\epsilon = 20\%$	$\epsilon = 50\%$	$\epsilon = 75\%$	$\epsilon = 20\%$	$\epsilon = 50\%$	$\epsilon = 75\%$	$\epsilon = 20\%$	$\epsilon = 50\%$	$\epsilon = 75\%$	$\epsilon = 20\%$	$\epsilon = 50\%$	$\epsilon = 75\%$
Деформ.	1800	2070	2210	-	-	-	-	-	-	-	-	-
950 °С	1620	1900	2360	-	-	-	4,0	1,0	0	-	-	-
1070 °С	1310	1340	1450	921	967	1021	18,2	20,0	15,5	17,5	19,0	15,0
1130 °С	1200	1190	1310	896	878	924	24,0	25,1	23,2	20,0	19,5	19,3
1170 °С	1150	1160	1180	-	-	-	26,0	26,9	25,6	21,0	20,5	20,4
1200 °С	1110	1120	1140	840	855	863	27,3	31,0	27,2	21,5	24,0	21,3

На рис.3 представлена зроблена за допомогою растрового електронного мікроскопу мікроструктура сплаву у рекристалізованому стані ($T_{\text{від.}} = 1170$ °С), оптична мікроструктура якого показана на рис.1, ж. Як видно з рис.3, однофазний стан не досягається, у той же час сплав при цьому має високу технологічну пластичність.

Що стосується специфічного впливу електроструму на механізм знеміцнення і структуру, те загальноприйнято вважається думка, що цього впливу немає, тому що нагрівання з однієї і тією ж швидкістю різними способами не дає скільки-небудь помітних розходжень у структурі [5, 6]. Виключенням є явище, умовно назване „електропластичним ефектом”, яке полягає у підвищенні пластичності деформованих металів під дією електричного струму великої щільності (10^5 А/см²) і під впливом інтенсивного електронного опромінення [7]. Але у літературі є відомості [5], що при нагріванні металів, деформованих з критичними ступенями деформації (для нікелю це деформації 5-7%) у залежності від швидкості нагрівання змінюється механізм знеміцнення. При цьому встановлено, що вплив швидкості нагріву особливо помітно виявляється при переході від пічного нагрівання до індукційного нагрівання з порівняно невеликими швидкостями нагріву. Автори вважають, що при відпалі у печі міграція границь під дією пружних об'ємних напружень є переважаючою, тоді як в умовах швидкісного нагрівання домінує стабілізуюча полігонізація, яка призводить до більш дрібнозернистої структури у порівнянні з пічним нагріванням.

На підставі існуючих експериментальних даних, що відносяться до сплаву ЕІ 828-ВД, можна стверджувати про зміну механізму знеміцнення не стільки зі зміною швидкості нагрівання, скільки зі зміною умов нагрівання. На даний час ще не зовсім зрозумілі причини формування у сплаві у випадку електроконтактного нагрівання при 1000 °С особливої структури у вигляді великих витягнутих зерен вздовж осі дроту, що передує процесам первинної рекристалізації.

Визначено, що такий механізм знеміцнення дозволяє формувати дрібнозернисту структуру γ -матриці і такий структурний стан γ' -фази, які мають більш високі характеристики пластичності. При цьому важливу роль має не відсутність γ' -фази.

Таблиця 2

Вплив ступеня деформації та температури відпалу на механічні властивості дроту зі сплаву ЭИ 828-ВД

Стан зразка	σ_B , МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ_p , %			ψ_p , %		
	$\epsilon = 20\%$	$\epsilon = 50\%$	$\epsilon = 75\%$	$\epsilon = 20\%$	$\epsilon = 50\%$	$\epsilon = 75\%$	$\epsilon = 20\%$	$\epsilon = 50\%$	$\epsilon = 75\%$	$\epsilon = 20\%$	$\epsilon = 50\%$	$\epsilon = 75\%$
850 °С	1698	2007	2358	1552	-	-	3,7	0,5	-	2,4	-	-
1000 °С	1533	1646	1843	1261	1535	1791	7,5	3,0	0,5	6,0	3,6	-
1100 °С	1358	1319	1402	1021	1009	1062	15,0	14,0	13,5	15,4	13,1	14,3
1150 °С	1155	1231	1281	938	936	990	15,5	15,5	13,5	19,9	19,9	18,2
1200 °С	1049	1007	1116	849	844	840	17,0	19,0	17,5	12,3	18,3	15,0

(прискорене пічне нагрівання, $V_n = 15$ К/с)

Відомо, що спадкова пластичність γ' -фази перешкоджає значному окрихчуванню на відміну від зміцнення фазами, що мають більш високу твердість, наприклад, карбідами [8]. Зміцнювальна роль γ' -фази залежить від її форми і розмірів. Визначено, що швидкісне нагрівання також дозволяє одержати γ' -фазу у такому структурному стані, який забезпечує досить високу пластичність сплаву у двофазному стані. Як показала практика, такий двофазний сплав можна продеформувати з досить великими сумарними обтисненнями. Прагнення до однофазного стану для поліпшення здатності до деформування навряд чи буде виправданим і, як нам представляється, не може бути реалізоване при будь-яких умовах у такому сильнолегованому сплаві як ЭИ 828-ВД.

Список літератури

1. Зимина Л.Н. Влияние легирующих элементов и термической обработки на кинетику структурных превращений и свойства жаропрочных сплавов систем Ni-Cr-Al. // Специальные стали и сплавы -М.:Металлургия, 1966, вып.46, с.114-139.
2. Березина А.Л., Гриднев В.Н., Ефимов А.И., Леженина Г.Н., Чуистов К.В. Исследование процессов выделения γ' -фазы при старении сплава ХН70МВЮ-ВД. // Жаропрочные стали и сплавы на никелевой основе.-М.:Наука, 1984, с.160-164.
3. Гриднев В.Н., Ефимов А.И., Осипенко И.А., Созинов А.Л. Особенности концентрационных изменений в твердом растворе деформированного сплава Ni - 7,1 вес.% Al в процессе скоростного нагрева. //Металлофизика. 1983, №1, с.108-112.
4. Гриднев В.Н., Ефимов А.И., Осипенко И.А., Созинов А.Л. Структура сплава Ni -7,1 вес.% Al в частично рекристаллизованном состоянии, полученном при скоростном электронагреве. //Металлофизика, 1983, №5, с.98-99.
5. Иванов В.И., Осипов К.А. Возврат и рекристаллизация в металлах при быстром нагреве. - М.: Наука, 1964, -262 с.
6. Бодяко М.Н., Астапчик С.А., Ярошевич Г.Б. Термокинетика рекристаллизации. - Минск: Наука и техника, 1968, -251с.
7. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов.-М.:Наука, 1985, -160с.
8. Симпс Ч., Хагель Б. Жаропрочные сплавы. -М.:Металлургия, 1976, -567с.