

С. Б. Михайлов^{1*}, Б. А. Потехин², Н. А. Михайлова³, И. Н. Сагадеев¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

²Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург

³Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург

**msb.immt@gmail.com*

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ЛИТЕЙНЫХ ИНВАРНЫХ СПЛАВОВ

Получена информация о влиянии режимов отжига на инварный и размерный эффекты образцов литого состояния литейного инварного сплава Fe–Ni(38)–C(2,5).

Ключевые слова: литейные инварные сплавы, дилатограммы, инварный и размерный эффекты.

S. B. Mikhaylov, B. A. Potekhin, N. A. Mikhaylova, I. N. Sagadaev

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON CHANGES IN MAJOR DILATOMETRIC EFFECTS OF INVAR ALLOYS CASTING

Information has been obtained on the effect of annealing conditions on the Invar and dimensional effects specimens cast foundry state Invar alloy Fe–Ni(38)–C(2,5).

Keywords: Invar alloys foundry, dilatometric curves Invar and size effects.

С целью получения дополнительной информации о формировании базовых свойств хорошо известных литейных Fe–Ni сплавов с повышенным содержанием углерода [1] проведена серия дилатометрических измерений по влиянию длительных (2 часа) и кратковременных (1 мин) отжигов с нагревом до различных температур образцов литого состояния инварного сплава Fe–Ni(38)–C(2,5).

Измерения проводились на стандартном дилатометре Шевенара фирмы «Амслер» [2] с преимущественным использованием высокочувствительной измерительной головки HS и дополнительным контролем температуры при однотипном медленном нагреве/охлаждении образца со скоростью примерно 0,1 гр./сек.

С целью получения информации без искажений все результаты измерений представлены копиями дилатограмм в координатах температура – удлинение стандартного образца с размерностью по осям в миллиметрах. Основные образцы квадратного сечения с диагональю 4 мм

и длиной $50 \pm 0,1$ мм механически вырезались из слитка разлитого в холодную металлическую изложницу диаметром 70 мм. Длительный отжиг образцов (2 часа) при температурах 750, 900, 1000–1200 °С реализован в трубчатой печи, циклирование (до пяти раз) кратковременными отжигами 900 °С, 1 мин проводилось непосредственно в dilatометре.

На дилатограммах нагрева до 250 °С (рис. 1, а) при непосредственной прямой регистрации теплового удлинения образца измерительной головкой VHS (рис. 1, а) инварный эффект исследованного литейного сплава в сопоставлении с алюминием, медью и кричным железом проявляется в виде заниженного угла наклона дилатограммы. Он обычно характеризуется малыми значениями коэффициента линейного теплового расширения (ТКЛР).

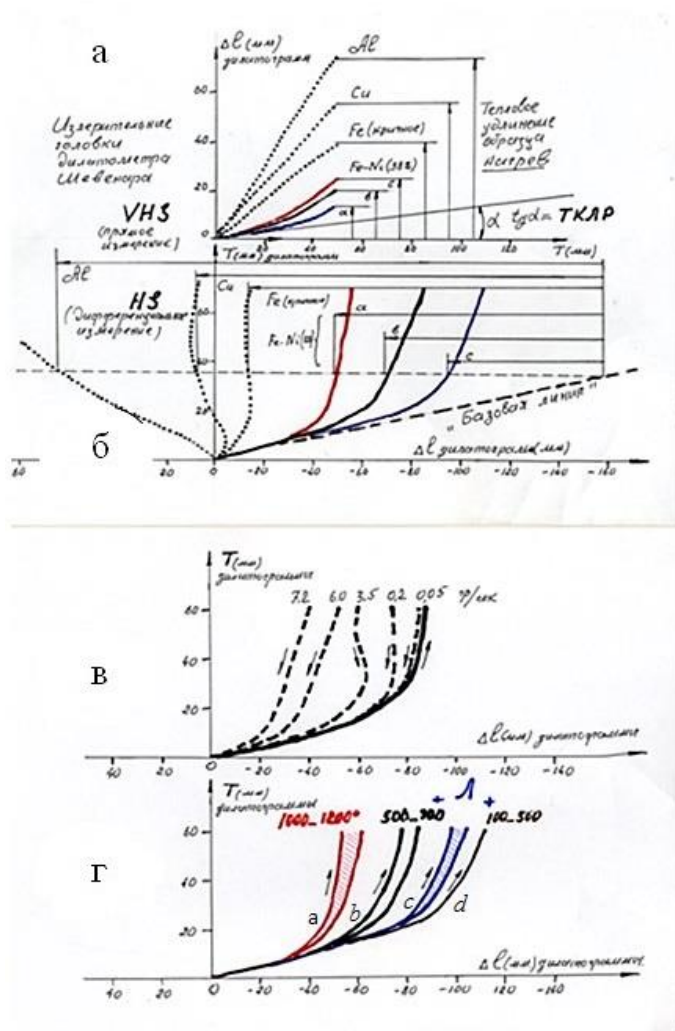


Рис. 1. Первичные дилатограммы прямых (а) и дифференциальных (б, в, г) измерений: а, б – для одномерных образцов различных материалов Al, Cu, Fe, Fe–Ni(38)–C (2,5); в – влияние скорости изменения температуры (7,2; 6,0; 3,5; 0,2; 0,05 град/с) на вид дилатограмм охлаждения (пунктир) по сравнению с дилатограммой медленного (0,05 град/с) нагрева образца литейного инвара (сплошная линия); г – области расположения дилатограмм медленного нагрева (0,05 град/с) после предварительного отжига в температурных интервалах 100...500 °С (д), 500–900 °С (б), 1000...1200 °С (а) литых состояний образцов литейного инварного сплава (Л) – (с).

С переходом на измерительную головку HS с дифференциальной схемой регистрации (рис.1, б) существенно возрастает чувствительность регистрации величины теплового расширения образца. Она регистрируется при фиксированной температуре в виде разности между дилатограммой и

«Базовой линией» (горизонтальные линии). В данном случае ось температур повернута на 90 °С по сравнению с рис.1, *a*. При этом по моменту интенсивного отклонения дилатограммы от «Базовой линии» фактически фиксируется температурный предел проявления технической используемой инварности сплава. В данном случае, переход от дилатограммы (*c* – синяя линия) к дилатограмме (*a* – красная линия) связан с переходом от литого состояния образца к состоянию с предварительным отжигом при 1200°С.

Процесс формирования инварного состояния инерционен, что иллюстрируют пунктирные кривые (рис. 1, *b*), полученные при охлаждении с различной скоростью от 900 °С (7,2; 6,0; 3,5; 2; 0,05 град/с). В связи с этим все измерения проводились при строго однотипном изменении скорости нагрева/охлаждения порядка 0,1–0,05 град/с, когда, судя по рис. 1, *b*, дилатограммы охлаждения и нагрева (сплошная линия) практически совпадают.

Совместное сопоставление всех, полученных в работе, дилатограмм позволило сформулировать вывод о **дискретном** влиянии температуры и времени отжига литых состояний на проявления температурного интервала практически используемой инварности сплава (минимальные значения).

Так, длительные отжиги (2 часа) сопровождаются существованием фиксированных областей изменения дилатограмм (рис. 1, *z*). Область, характерная для прохождения дилатограмм литого состояния (*c*). Нагревы литого состояния до 500 °С, как правило, сопровождаются некоторым расширением области инварности. Нагревы 500–900 °С способствуют смещению области инварности, отмеченной на рис.1, *z* (*b*). К еще большему смещению приводят нагревы выше 1000 °С, вплоть до 1200 °С, область (*a*). Кратковременные подобные нагревы длительностью порядка 1 мин приводят к небольшим смещениям хода дилатограмм в пределах выделенных областей.

Можно предположить, что отмеченные выше области связаны с протеканием при первом нагреве литого состояния исследованного сплава процесса, сопровождающегося дилатометрическим эффектом в температурном диапазоне 600–900 °С. Этот эффект в виде максимума наблюдается на дилатограммах первого нагрева литых состояний. Пример такой дилатограммы кратковременного нагрева до 900 °С представлен на рис. 2, *a* в виде левой петли «нагрев – охлаждение» (сплошная линия – *c*). При последующих циклах подобных нагревов (*b*), дилатометрический максимум никогда не наблюдался. При этом гистерезис петли хода кривых «нагрев – охлаждение» менял знак и практически сходил на нет к пятому циклу.

Следует отметить, что длительный отжиг (2 часа) при температурах 750 и 900 °С существенным образом способствовал изменению формы

дилатометрической петли. Эти изменения отражены на рис. 2, а при сопоставлении дилатограммы первого нагрева литого состояния (левая синяя петля) с дилатограммами первого нагрева образцов, прошедших длительный отжиг на 750 и 900 °С (b, отмеченные точками).

Имеют место следующие особенности: рассмотренное выше сокращение температурного интервала инварного эффекта; отсутствие дилатометрического эффекта температурного интервала 600–900 °С; появление эффекта значительного сокращения размеров образца, что привело к большому гистерезису в ходе дилатометрических кривых «нагрев – охлаждение». Обычно к пятому циклу кратковременных нагревов до 900 °С гистерезис сходит на нет, и петли дилатограмм приобретают вид дилатограмм пятого цикла кратковременных нагревов литого состояния типа правой петли рис. 2, а.

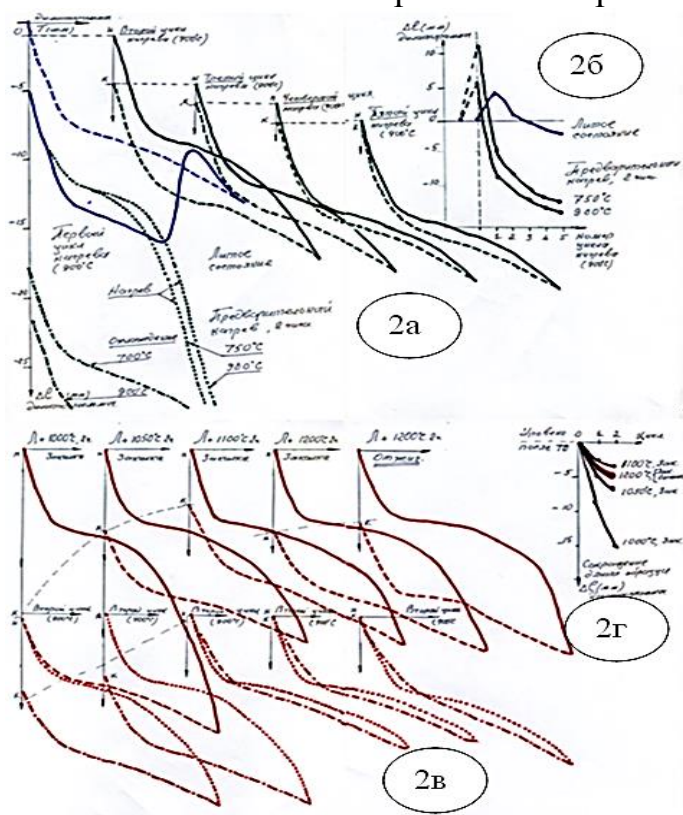


Рис. 2. Первичные дилатограммы литейного инвара (а, в) «нагрев – охлаждение» (сплошная линия – пунктир) и результаты измерения длины образцов при комнатной температуре (б, г) после кратковременных вариантов нагревов до 900 °С: а, б – в процессе пятикратных контрольных нагревов до 900 °С образцов литого состояния и прошедших предварительный отжиг на 750 °С и 900 °С; б, г – примеры результатов аналогичных измерений на образцах прошедших предварительный отжиг при температурах выше 1000 °С

При рассмотрении представленных дилатометрических петель (рис. 2) «нагрев – охлаждение» выявлен **размерный эффект** изменения длины образцов при комнатной температуре. Обычно любой первый отжиг 600–900 °С сопровождался «распуханием» образца, а последующие отжики приводили к сокращению его длины в зависимости от предшествовавшей термической обработки. Этот эффект иллюстрируется графиками на рис. 2, б циклирование кратковременными отжигами предварительно отожженных образцов привело к значительному размерному эффекту сокращения размеров по отношению к нагревам литого состояния.

Создается впечатление, что рассмотренные эффекты сокращения температурного интервала инварности и характерные изменения размеров

образца непосредственно связаны с реализацией процесса (V), протекающего при нагреве литого состояния в температурном диапазоне 600–900 °С. Дополнительно к этому процессу в структуре образца необходимо рассмотрение изменений, реализуемых при отжигах в интервале 1000–1200 °С, процесс W, приводящий к дальнейшему скачкообразному сокращению температурного диапазона инварности, ускорению в изменении размерного фактора и формы дилатометрических петель «нагрев – охлаждение» при стандартных кратковременных отжигах 900 °С.

Сказанное иллюстрируется графиками на рис. 2, в и г. Так, верхний ряд дилатометрических петель рис. 2, в представлен дилатограммами первого нагрева после длительных нагревов (2 часа) с последующей закалкой в воду от температур 1000, 1050, 1100, 1200 °С соответственно. В последнем случае охлаждение от 1200 °С проводилось медленно «в печи».

Второй ряд – это дилатограммы повторного кратковременного отжига 900 °С. По виду дилатометрических петель этого ряда можно выделить два температурных диапазона нагревов. Так, с увеличением температуры нагрева от 900 до 1100 °С происходит постепенное сокращение гистерезиса кривых «нагрев – охлаждение». При нагревах 1100 °С и выше этот гистерезис практически исчезает при первом нагреве и существенно сокращается его размерный эффект, судя по графикам рис. 2, г. Примечательно, что дилатограммы закаленного и отожженного от 1200 °С состояний, практически неразличимы между собой.

Таким образом, проведенные дилатометрические измерения образцов литейного инварного сплава Fe–Ni(38)–C(2,5) после различных вариантов отжига литых состояний позволили выделить как минимум два процесса V и W. Реализация этих процессов при нагреве сплавов наследственно влияет на дилатометрические эффекты в виде изменения температур реально применяемой инварности и изменения конечных размеров образцов после термической обработки.

Высказано предположение, что природа выделенных эффектов V и W связана с наличием атомов углерода в твердом растворе структуры сплава и протеканием эффектов **гибридизации электронных орбиталей** этих атомов в процессе термической обработки сплавов, вызывая варианты проявления инварности и реализации графитизации структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович С. В. Изготовление прогрессивных литых заготовок из сплавов с заданным тепловым расширением. Аналитический обзор за 1953–1988 гг. № 4891. М. : ЦНИИ информации и ТЭИ, 1989. 68 с. ДСП.
2. Черепин В. Т. Экспериментальная техника в физическом металловедении. Киев: Техника, 1968. С. 280.