

УДК 538.13; 546.76

© 1991

## ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ВЛИЯНИЕ ПОЛЯ НА ДОМЕННУЮ СТРУКТУРУ ХРОМА ПРИ 210—308 К

*В. С. Головкин, В. Ю. Панченко*

Нейтроннографически исследованы процессы формирования  $(I-Q)$ -состояния при криомагнитном (КМ) охлаждении и нагреве в поле  $2.5 T$ . Определен интервал максимальной эффективности КМ-охлаждения ( $\approx 257-283 K$ ). Показано, что нагрев в поле от  $230 K$  тоже приводит к созданию  $(I-Q)$ -состояния, но он менее результативен. В районе  $270 K$  обнаружен максимум действия поля на избранную модуляцию при фиксированных температурах. Установлено удовлетворительное совпадение рабочего интервала КМ-охлаждения и нагрева в поле с температурной областью наиболее резкого изменения искажений кристаллической решетки.

На основании исследований нескольких иодидных кристаллов предполагалось [1], что криомагнитный (КМ) метод создания в хrome одно-модуляционного  $(1-Q)$ -состояния, заключающийся в охлаждении образца от комнатной температуры до  $230 K$  в магнитном поле вдоль избранного волнового вектора ( $Q, \parallel H$ ), более эффективен, чем известное охлаждение в поле через  $T_N$  ( $H_0$ -способ). Далее отмечалась [2] особенность интервала  $268-230 K$ , где, несмотря на почти двукратное сокращение температурной области действия поля, достигается практически такая же эффективность КМ-охлаждения, что и от  $293$  до  $230 K$ . Однако, как было обнаружено позже на другой серии образцов иодидного и дугового происхождения, КМ-охлаждение при таких же полях оказалось неработоспособным [3]. Неудача с созданием  $(1-Q)$ -состояния при помощи КМ-охлаждения постигла и авторов [4], изучавших анизотропию модуля упругости. На отожженном в течение  $72$  ч кристалле дугового происхождения Фосетт и др. [5] провели сравнение эффективности  $H_0$ - и КМ-методов ( $2.5 T$ ) и сделали вывод о несостоятельности последнего. После серии высокотемпературных отжигов образца дугового происхождения, на котором в исходном состоянии  $H_0$ - и КМ-методы при  $2.5 T$  практически не работали, мы наблюдали [6], что с увеличением продолжительности (или температуры) отжига сначала создается область состояний, где проявляется высокая эффективность КМ-охлаждения и невысокая работоспособность  $H_0$ -метода, а затем — область состояний, в которой КМ-метод становится неработоспособным, а  $H_0$ -способ достигает максимальной эффективности. И было высказано предположение, что появление области состояний с высокой эффективностью КМ-охлаждения обусловлено взаимодействием дефектов кристаллического строения с магнитоотрицательными эффектами в области, где работает КМ-метод и где с понижением температуры от  $T_N$  разность параметров кристаллической решетки вдоль вектора  $Q$ , и свободной осью сначала увеличивается до максимального значения ( $270 K$ ), а затем снижается до нуля при  $230 K$  [7].

Для выяснения деталей механизма и движущих сил процесса доменной перестройки при КМ-охлаждении в интервале  $230-308 K$  представлялось полезным а) в условиях комнатной температуры провести оценку последствий поэтапного действия КМ-охлаждения и нагрева в поле, б) исследовать поведение избранной модуляции непосредственно в процессах

КМ-охлаждение и нагрева в поле, в) оценить эффект действия поля на эту модуляцию при фиксированных температурах.

Исследование выполнялось на иодидном монокристалле ( $T_N=310 \pm \pm 0.2$  K) с наличием анизотропии ( $Q_x : Q_y : Q_z=42 : 33 : 25$ ), на котором КМ-охлаждение с Н вдоль каждого из векторов  $Q_i$  по эффективности превосходит  $H_0$ -метод. Основные измерения проводились при ориентации поля  $2.7 T$  параллельно вектору  $Q_x$ . Контроль за изменением состояния модуляций осуществлялся нейтронографически по интенсивности рефлексов типа  $(1-\delta, 0, 0)$ , а степень перехода кристалла в  $(1-Q)$ -состояние оценивалась при комнатной температуре по отношению интенсивности рефлекса подавляемой модуляции  $Q_y$  к интенсивности аналогичного сателлита избранной модуляции ( $I=I_y/I_x$ ).<sup>1</sup> В исходном состоянии при 295 K данное отношение равнялось в среднем (флуктуации анизотропии) 1.30, а после свободного охлаждения до 230 K и нагрева до 295 K вследствие уменьшения объема модуляции  $Q_x$  и увеличения модуляции  $Q_y$  оно увеличилось до 1.80. Т. е. температурный фактор в процессе КМ-охлаждения в данном случае действовал на модуляции  $Q_x$  в направлении, обратном влиянию поля. Изменение объема модуляции  $Q_x$  при свободном охлаждении представлено на рисунке зависимостью  $I$ , где, как и в [9], наблюдается небольшой максимум с центром в районе 270 K.

№ п/п	КМ-охлаждение		Нагрев в поле	
	Т, К	I	Т, К	I
1	308—230	$0.17 \pm 0.05$	230—308	$0.41 \pm 0.04$
2	308—295	$1.10 \pm 0.07$	230—244	$1.80 \pm 0.09$
3	295—293	$0.88 \pm 0.06$	244—257	$1.50 \pm 0.08$
4	283—270	$0.51 \pm 0.04$	257—270	$0.62 \pm 0.04$
5	270—257	$0.35 \pm 0.04$	270—283	$0.51 \pm 0.04$
6	257—244	$0.42 \pm 0.04$	283—295	$0.88 \pm 0.06$
7	244—230	$1.89 \pm 0.09$	295—308	$1.15 \pm 0.07$

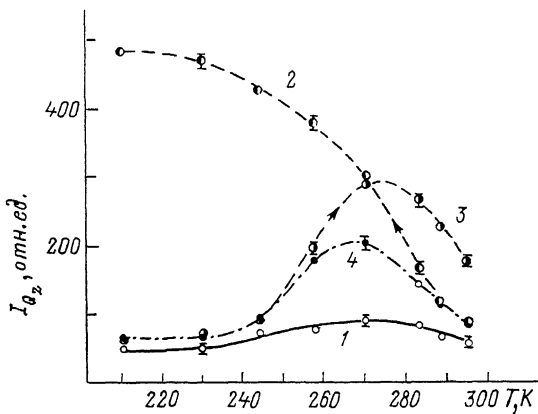
Результаты исследования последствий поэтапного действия КМ-охлаждения и нагрева в поле представлены в таблице. КМ-охлаждение во всем температурном интервале создает в данном образце довольно глубокое приближение к  $(1-Q)$ -состоянию (№ 1). При поэтапном понижении температуры от 308 K наблюдается увеличение эффективности КМ-охлаждения (№ 2—4), которая, пройдя через максимум при температурах 270—257 K, далее начинает падать (№ 6), приближаясь в последнем интервале практически к нулевому значению (№ 7). КМ-охлаждение от 270 до 230 K создает состояние с  $I \approx 0.27$ , т. е., как и в [2], практически почти такое же, что и во всем интервале (№ 1), а от 308 до 270 K — только с  $I \approx 0.44$ . При этом на первом этапе (№ 2) последнего интервала эффективность КМ-охлаждения незначительна (меньшее по сравнению с исходным значение  $I$  обусловлено изменением уровня анизотропии), а определяющими являются температуры 295—270 K. КМ-охлаждение от 283 до 257 K создает состояние с  $I \approx 0.20$ . Нагрев в поле от 230 K во всем температурном интервале, как видно из таблицы (№ 1), также приводит к формированию в образце  $(1-Q)$ -состояния, но с несколько меньшей эффективностью, чем при КМ-охлаждении. В данном случае максимальная эффективность наблюдается в основном в диапазоне 257—283 K (№ 4, 5) с некоторым смещением от 270 K в сторону высоких температур.

Поведение избранной модуляции  $Q_x$  непосредственно в процессах КМ-охлаждения и нагрева в поле демонстрируют на рисунке зависимости 2 и 3 соответственно. Как и в [1], при КМ-охлаждении основное увеличение

<sup>1</sup> Для идеальных  $(3-Q)$ - и  $(1-Q)$ -состояний  $I$  равно 1 и 0 соответственно. Под полным  $(1-Q)$  принято считать состояние, где  $I \leq 0.08$  [8].

объема модуляции происходит при температурах до 230 К с несколько более активным в данном случае интервалом выделения (290—270 К). В процессе нагрева в поле уменьшенная предварительным свободным охлаждением до 210 К модуляция  $Q_2$  (зависимость 3) начиная примерно с 230 К увеличивается и, достигнув около 270 К максимума, с некоторым замедлением (как и при поэтапном наблюдении процесса) уменьшается по мере приближения к  $T_N$ .

Действие поля на избранную модуляцию при фиксированных температурах демонстрирует зависимость 4, а вклад его в процессы КМ-охлаждения и нагрева в поле оценивается сравнением зависимостей 4 и 1. Как видно, вопреки мнению о малом влиянии поля в этих условиях на перестройку доменной структуры [10], здесь обнаружено эффективное действие его с максимумом в районе 270 К, где влияние  $H$  примерно в 5—6 раз выше, чем при 230 и 295 К. Наша попытка обнаружить в районе 230 К особую реакцию избранной модуляции на действие  $H = 2.5 T$  оказалась безрезультатной.



Поведение модуляции  $Q_2$ .

1 — свободное охлаждение (сплошная линия — усредненные значения без приведения экспериментальных точек, а каждая из представленных экспериментальных точек получена последовательным нагревом выше  $T_N$ ); 2 — КМ-охлаждение; 3 — нагрев в поле; 4 — действие поля при фиксированных температурах, соответствующих экспериментальным точкам зависимости 1.

Несмотря на имевшие место неудачи с формированием (1—Q)-состояния КМ-охлаждением [3, 4] и утверждения о его несостоятельности [5, 11], изложенный здесь экспериментальный материал служит дополнительным подтверждением реальности (при невыясненных до конца условиях [6]) радикальной силовой перестройки доменной структуры хрома при температурах выше 230 К и расширяет представления об этом процессе в целом. Под действием КМ-охлаждения от 308 до 295 К перестройка незначительна. Активное нарастание ее, наблюдаемое как по взаимному изменению двух модуляций (см. таблицу), так и по поведению избранной (зависимость 2), начинается, как и в [1], примерно от 295 К и достигает максимума в районе 270 К. На этом участке основной вклад в общий эффект обеспечивает увеличивающееся с понижением температуры действие  $H$ . При 270 К он составляет  $\approx 48\%$ , около 15% вносят температурные изменения, а остальная перестройка обеспечивается, очевидно, влиянием сил, связанных с магнитоstrictionными изменениями и ростом уровня анизотропии кристалла. Ниже 270 К, где действие температуры и поля убывает, перестройка, по данным поэтапного исследования, продолжает нарастать и затем прекращается около 240 К, а на основании поведения избранной модуляции она при снижении темпа растягивается, как и в [1], до 230 К. Результат о нарастании перестройки ниже 270 К находится в согласии с интерпретацией в [10] примерного равенства эффективности КМ-охлаждения в интервалах 295—230 и 270—230 К [2] как увеличение темпа перестройки в последнем интервале. Но падение темпа перестройку кон-

тролировалось непосредственно в процессе КМ-охлаждения, а отношение  $I$ , как и в [2], — после свободного нагрева от температур обработки до комнатной, что, по-видимому, менее достоверно, ибо при нагреве допустимы непропорциональное изменение модуляций  $Q_x$  и  $Q_y$  и уменьшение значения  $I$ . Этим же можно объяснить расхождение в оценке степени перестройки при 244—230 К. Выявление здесь в пределах  $26^\circ$  около 270 К уровня перестройки, практически равного достигаемому при охлаждении в  $H$  от 308 до 230 К, изменило прежние основанные на ограниченных данных представления об интервале 270—230 К как наиболее эффективном [2, 10].

Перестройка доменов при нагреве в  $H$  от 230 К определяется в основном (как и при КМ-охлаждении до 270 К) нарастающим с повышением температуры действием  $H$  и достигает в районе 270 К такого же уровня, что и при КМ-охлаждении до этой температуры. Далее в соответствии с уменьшением степени анизотропии кристалла она, изменив знак, замедляется. И в итоге в условиях комнатной температуры после нагрева как во всем интервале, так и на наиболее эффективном его участке (257—283 К) наблюдается меньшее приближение к  $(1-Q)$ -состоянию, чем в результате соответствующих КМ-охлаждений.

Совпадение температур начала резкого роста избранной модуляции при КМ-охлаждении и нагреве в  $H$  с границами температурной области наибольшего влияния поля при постоянном режиме показывает, что силовая перестройка наиболее результативна в пределах 240—290 К. И данный интервал удовлетворительно соответствует температурной области, где разность параметров кристаллической решетки вдоль вектора  $Q_i$  и свободной осью претерпевает в районе 270 К наибольшие изменения [7]. Такое совпадение служит экспериментальным подтверждением данных [1, 2] о том, что источником перестройки являются магнитострикционные искажения, а движущей силой — изменение искажений с температурой. В [10, 12] в рамках гипотезы о двухэкстремальной температурной зависимости энергии магнитокристаллической анизотропии (МКА) дано представление аномалий перестройки доменов при КМ-охлаждении как результат подавления с понижением свободной энергии кристалла барьеров МКА энергией магнитного поля и силами упругих деформаций. Однако интерпретация обнаруженных нами эффективного действия поля, оказывающего существенное влияние на перестройку при этих температурах, и создания  $(1-Q)$ -состояния при нагреве в  $H$  в процессе роста свободной энергии кристалла с позиции этой модели, по-видимому, затруднительна.

#### Список литературы

- [1] Головкин В. С., Быков В. Н., Левдик В. А. // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 14. № 6. С. 382.
- [2] Головкин В. С., Быков В. Н., Левдик В. А., Устинов А. И., Баринев И. П. // ФТТ. 1977. Т. 19. № 11. С. 3439.
- [3] Головкин В. С., Быков В. Н., Панченко В. Ю. // Металлофизика. 1986. Т. 8. № 3. С. 39.
- [4] van Rijn H. J., Alberts H. L. // J. Phys. F. 1983. V. 13. P. 1559.
- [5] Фосетт Э., Холден Т. М., Мьюир В. К., де Камарго П. С. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. № 3. С. 379.
- [6] Головкин В. С., Панченко В. Ю. // ЖЭТФ, 1991. Т. 99. N 11. С. 1654—1661.
- [7] Steinitz M. O., Schwarts L. H., Marcus J. A. et al. // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 23. N 17. P. 979.
- [8] Werner S. A., Arrott A., Kendrick H. // J. Appl. Phys. 1966. V. 37. N 3. P. 1260.
- [9] Головкин В. С., Быков В. Н., Левдик В. А. // ЖЭТФ. 1965. Т. 49. № 10. С. 1083.
- [10] Левдик В. А. // ЖЭТФ, 1989. Т. 95. № 5. С. 1784.
- [11] Fawcett E. // Rev. Mod. Phys. 1988. V. 60. N 1. P. 209.
- [12] Левдик В. А., Быков В. Н. // Препринт ФЭИ-1862. Обнинск, 1987.