

УДК 534.29

©1994

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ КРИСТАЛЛОВ KCl, ПРОШЕДШИХ УЛЬТРАЗВУКОВУЮ КАВИТАЦИОННУЮ ОБРАБОТКУ

Е.Б.Борисенко, В.Н.Ерофеев, Э.В.Кустерев

Изучено влияние ультразвуковой кавитационной обработки на механические свойства ряда щелочно-галлоидных кристаллов, в первую очередь KCl. Установлена связь между условиями ультразвуковой кавитационной обработки и механическими свойствами и структурой обработанных кристаллов. Обнаружена корреляция между жесткостью исходных кристаллов и их пластичностью после ультразвуковой обработки. Дан анализ возможных причин повышения пластичности кристаллов под воздействием ультразвуковой кавитации.

Авторами данной статьи было ранее обнаружено, что ультразвуковая кавитационная обработка (УЗКО) способна оказывать влияние на механические свойства щелочно-галлоидных кристаллов: предел текучести σ_y и предельную деформацию ϵ_s (при одноосном сжатии) [1,2].

Были исследованы зависимости σ_y и ϵ_s для кристаллов KCl от времени t УЗКО и амплитуды ультразвуковых колебаний ξ . Оказалось, что σ_y растет со временем обработки, достигая насыщения за одно и то же время при амплитудах ультразвука 5, 10, 20 мкм; ϵ_s со временем УЗКО меняется немонотонно, кривая $\epsilon_s(t)$ имеет максимум. Величина и время достижения этого максимума зависят в первую очередь от значения ξ , а также от параметров рабочей жидкости и ориентации образцов при УЗКО [2].

Более детальные исследования кривых деформации кристаллов KCl, прошедших УЗКО в различных режимах, позволили выяснить, что УЗКО влияет не только на σ_y и ϵ_s , но и на другие характеристики механических свойств, изменяя вид кривых деформации (рис. 1). Из этого рисунка видно, что стадия легкого скольжения обработанных ультразвуком кристаллов короче, чем у исходных, она сокращается и практически исчезает при увеличении времени обработки. На кривой деформации образцов, прошедших УЗКО в режиме $\xi = 5$ мкм, $t = 30$ мин в керосине, за пределом текучести сразу следует вторая стадия. Причем в отличие от исходных кристаллов упрочнение на второй стадии не является линейным.

В [2] упоминалось, что коэффициент упрочнения, характеризующий начало параболического участка стадии II, изменяется немонотонно со временем УЗКО. Анализ кривых деформации позволил проследить за изменением этого и других параметров деформационных кривых с изменением t и ξ . Перед УЗКО кристаллы подвергались отжигу при $0.7T_m$ (T_m — температура плавления) в течение 2 ч с последующим

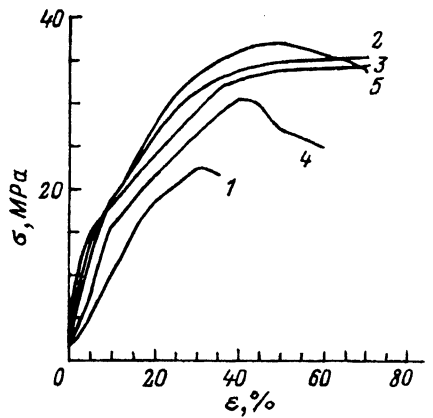


Рис. 1. Типичные кривые напряжение-деформация для кристаллов KCl, деформация сжатием по [001].

1 — без бработки; 2 — $\xi = 5$ мкм, $t = 10$ мин; 3 — $\xi = 5$ мкм, $t = 30$ мин, ориентация при УЗКО $\langle 110 \rangle$; 4 — $\xi = 5$ мкм, $t = 10$ мин, кристалл выращен по методу зонной плавки; 5 — $\xi = 5$ мкм, $t = 30$ мин; 2, 4, 5 — ориентация при УЗКО- $\langle 100 \rangle$.

медленным охлаждением. УЗКО проводилась в гептане. Результаты анализа для образцов KCl двух ориентаций представлены в табл. 1.

Различный характер кривых деформации исходных и прошедших УЗКО кристаллов может быть связан с различиями в микроструктуре этих образцов. С помощью методов химического травления нам удалось проследить за эволюцией деформационной структуры на различных стадиях деформации. В табл. 2 приводятся данные по микроструктуре кристаллов KCl, деформированных до $\epsilon = 10\%$, для исходных и прошедших различную УЗКО образцов. Эти результаты показали, что ширина полос скольжения, расстояния между ними меняются с изменением ξ и t .

Деформация таких образцов до больших степеней (80–90%) приводит к образованию поликристалла (рис. 2, а) с размером зерна 10–12 мкм. При выдержке деформированных образцов при комнатной температуре в них протекает рекристаллизация, в процессе которой растут равноосные зерна (рис. 2, в).

Как уже указывалось, УЗКО при различных режимах приводит к неодинаковым изменениям ϵ_s . Образцы, обладающие повышенной пла-

Таблица 1

Влияние ультразвуковой обработки в кавитирующей жидкости на параметры кривой деформации кристаллов KCl

Режим обработки		ориентация	$\Delta\epsilon_I$, %	ϵ_{II} , %	ϵ_{III} , %	$\Theta_{II} \cdot 10^{-3} G$	ϵ_s , %	σ_s , МПа
ξ , мкм	t , мин							
без обработки		$\langle 100 \rangle$	4	4	15	4.4	35	25
5	30	$\langle 100 \rangle$	0.5	0.5	36	3.1	70	36
5	60	$\langle 100 \rangle$	1.5	1.5	17	3.9	45	31
5	10	$\langle 110 \rangle$	1	1	37	3.9	60	38
5	30	$\langle 110 \rangle$	0	0	35	3.2	70	35
5	60	$\langle 110 \rangle$	0	0	40	3.2	70	33
10	5	$\langle 100 \rangle$	1.5	1.5	18	4.9	45	29
10	10	$\langle 100 \rangle$	1.5	1.5	28	5.8	60	28
10	30	$\langle 100 \rangle$	3	3	25	7.5	35	42

Влияние ультразвуковой кавитационной обработки на некоторые параметры деформационной структуры кристаллов КСІ в объеме образцов

Режим обработки		Ширина полос скольжения, мкм	Расстояние между полосами, мкм.	Протяженность полос сброса, мкм
ξ , мкм	t , мин			
без обработки		120	40	70
5	10	40	20	20
5	30	60	20	40
20	5	90	30	35
20	30	100	30	40

стичностью после УЗКО, которая, однако меньше максимальной ϵ_s^{\max} [2], разрушаются на более ранних стадиях. Как видно из сравнения картин изломов исходных кристаллов и образцов после УЗКО (рис. 3), характер разрушения в этих двух случаях неодинаков. Исходный кристалл разрушается хрупко, о чем свидетельствует ручьиный узор на рис. 3, а. На изломе кристалла после УЗКО видны ячейки, вытянутые в направлении легкого скольжения (рис. 3, в).

В целом экспериментальные результаты по развитию деформационной структуры необработанных кристаллов КСІ и образцов, пластичность которых повысилась под воздействием УЗКО, указывают на более однородный характер деформации обработанных ультразвуком образцов.

Рассмотрим возможные причины повышения пластичности щелочно-галоидных кристаллов под действием УЗКО. Известны различные способы повышения пластичности щелочно-галоидных кристаллов: облучение кристаллов, позволяющее осуществить деформацию по одной системе скольжения [3]; ультразвуковая обработка в сочетании со статическим нагружением [4]; горячая пластическая деформация (ГПД) [5]; пластическая деформация при повышенных температурах, сопровождаемая локализацией деформации [6].

Повышение ϵ_s в случае деформации по одной системе скольжения происходит в основном за счет удлинения стадии легкого скольжения. При обработке ультразвуком кристаллов, испытывающих статическое нагружение, наблюдается понижение предела текучести, обусловленное отрывом дислокационных сегментов от слабых центров закрепления [7]. В условиях горячей пластической деформации облегчается поперечное скольжение дислокаций, интенсивно идут диффузионные процессы. Все это приводит к увеличению доли третьей стадии на кривых деформации, к наблюдаемому при ГПД процессу динамической рекристаллизации [4]. Наблюдаемое повышение ϵ_y после УЗКО в кристаллах КСІ не сопровождалось изменениями механических характеристик, за счет которых происходит повышение пластичности в указанных случаях [3-6].

В предыдущих работах [1,2] было высказано предположение о том, что более однородный характер деформаций прошедших УЗКО образцов обусловлен наличием в них однородно-распределенных в объеме

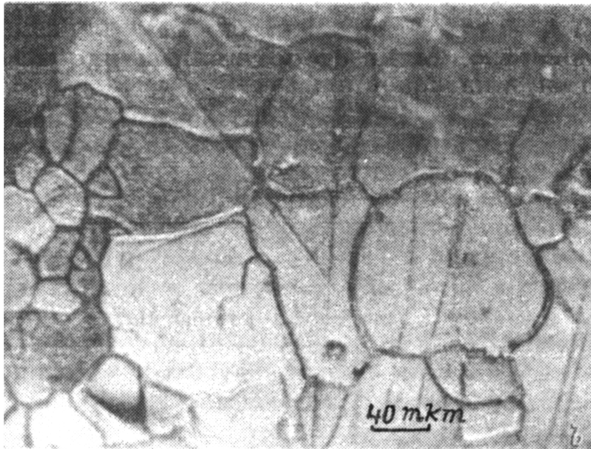
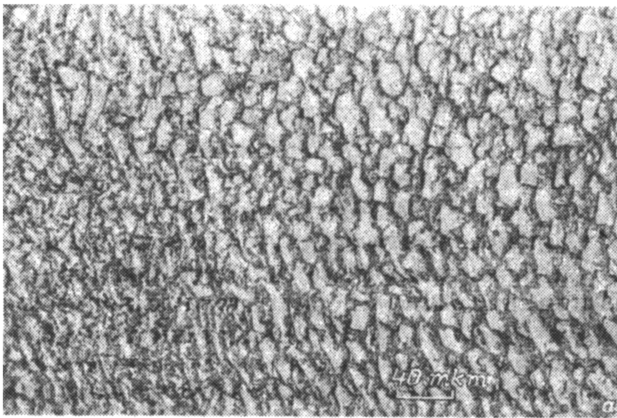


Рис. 2. а) Структура кристалла, характерная для образцов KCl, деформированных после УЗКО до 70–80%; режим УЗКО $\xi = 5$ мкм, $t = 10$ мин.
 б) Структура кристалла KCl, деформированного после УЗКО и состаренного в течение 30 дней при комнатной температуре ($\epsilon = 70\%$).

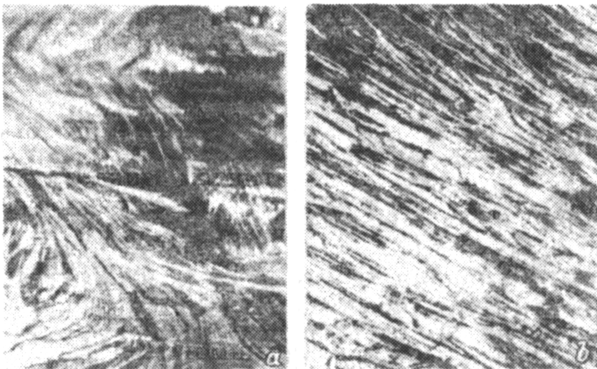


Рис. 3. Картина изломов кристаллов KCl.
 а — без обработки; б — $\xi = 5$ мкм, $t = 10$ мин, деформация $\epsilon = 30\%$.

Отношение давления кумулятивной струи к пределу текучести в кристаллах разной жесткости

	KCl	KBr	NaCl	LiF	KCl:Ca ²⁺ , 10 ⁻²	KCl:Ca ²⁺ , 10 ⁻¹	KCl:Ca ²⁺ , 10 ⁰
	вес кальция, %						
τ_c/τ_y	3.1	3.4	2	0.7	1.25	0.83	0.3

источников дислокаций, возникших под влиянием ультразвуковой кавитации.

Оценки давлений, действующих на обрабатываемую поверхность при схлопывании вблизи нее кавитационных пузырей [1], позволили показать, что величина давлений достаточна для рождения свежих дислокаций в обрабатываемых кристаллах. Например, отношение давления, действующего в плоскости скольжения (τ_c), для кристаллов KCl в три раза превышает значение напряжения сдвига τ_y в этой плоскости.

Тот факт, что в образцах KCl, обладающих повышенной пластичностью после УЗКО, сокращается стадия легкого скольжения, а упрочнение на второй стадии идет нелинейно, свидетельствует, очевидно, об активизации источников дислокаций в двух системах скольжения.

Как показано в настоящей работе, микроструктура деформированных образцов и характер разрушения свидетельствуют о том, что деформация в образцах, прошедших УЗКО в режимах, обеспечивающих повышенную ϵ_s , протекает более однородно, чем в исходных. Из приведенных рассуждений о возможных причинах повышения пластичности кристаллов под действием ультразвуковой кавитации следует, что такой причиной может быть наблюдаемое увеличение однородности деформации обработанных кристаллов.

С увеличением жесткости кристаллов от KCl к LiF либо в легированных кристаллах KCl:Ca, KCl:Sr при увеличении концентрации легирующего компонента отношение τ_c/τ_y уменьшается (табл. 3). Авторами данной работы было экспериментально установлено, что эффект повышения пластичности щелочно-галогидных кристаллов под влиянием УЗКО уменьшается с увеличением жесткости кристаллов. У кристаллов, для которых отношение τ_c/τ_y меньше единицы, повышения ϵ_s под действием УЗКО ξ в интервале 5–20 мкм за время обработки 1–60 мин не наблюдалось. Этот результат находится в соответствии со сделанным ранее предположением о том, что под действием УЗКО в объеме образцов появляются свежие дислокации, движение и размножение которых при последующей деформации обеспечивает наблюдаемую повышенную ϵ_s обработанных кристаллов.

Следует учесть, что наряду с действием силовых импульсов, возникающих при схлопывании кавитационных пузырей у поверхности, могут существовать и другие механизмы, приводящие к активизации источников дислокаций под действием УЗКО.

Например, появление дислокаций возможно вследствие неоднородности напряжений в кристаллах, вызванной наличием температурного градиента. При схлопывании кавитационных пузырей парогазовая смесь в них нагревается до сотен градусов [8]. Можно предположить, что их схлопывание способно вызвать локальный нагрев поверхности, нахо-

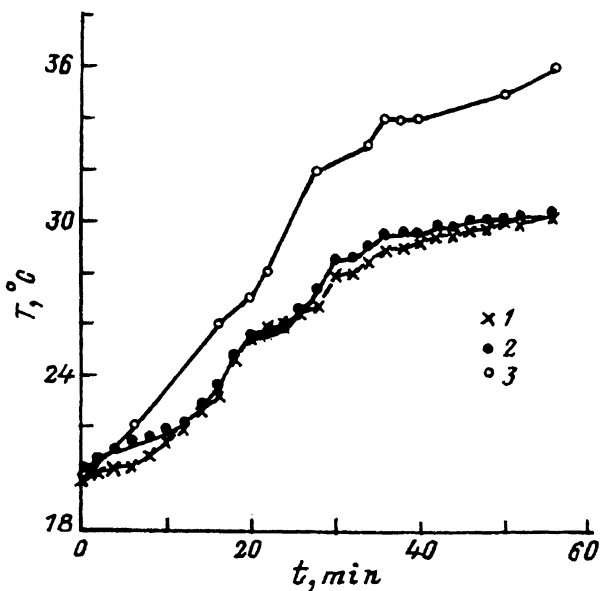


Рис. 4.

1 — показания верхней термопары (термопара хромель-алюмель), 2 — показания нижней термопары, 3 — показания термометра. $\xi = 20$ мкм, $t = 60$ мин.

дющейся в области развитой кавитации. Однако, как показали наши эксперименты, температура верхней поверхности, ближней к волноводу, равна температуре нижней поверхности при амплитудах ультразвука 5 и 20 мкм на протяжении всего времени обработки.

В первом случае ($\xi = 5$ мкм) температура не отличалась от комнатной на протяжении 90 мин, а во втором случае ($\xi = 20$ мкм) за то же время температура увеличилась на 9 градусов (рис.4), как и температура окружающей жидкости. По-видимому, накопленная пузырьками энергия расходуется на их поступательное движение, переходит в кинетическую энергию струи при схлопывании пузырька у стенки [9], рассеивается в жидкость при пульсациях пузырей [10], а также за счет перемешивания жидкости при распространении в ней мощного ультразвука происходит интенсивный теплообмен между образцом и окружающей его жидкостью [8]. Из сказанного следует, что термоградиент не может быть причиной появления свежих дислокаций в кристаллах под действием УЗКО.

Список литературы

- [1] Абрамов О.В., Борисенко Е.Б., Ерофеев В.Н. // АН СССР. 1989. Т. 308. № 5. С. 1119-1122.
- [2] Борисенко Е.Б., Ерофеев В.Н., Кистерев Э.В. // Препринт. Черноголовка. 1989. 16 с.
- [3] Смирнов Б.И. Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. Л.: Наука, 1981. 234 с.
- [4] Малик Г.Н. // Автореф. канд. дис. Харьков. ХГУ. 1982. 21 с.
- [5] Горбунов А.В., Вальковский С.Н., Ерофеев В.Н. // Препринт. Черноголовка. 1983. 33 с.
- [6] Бережкова Г.В., Скворцова П.П., Перстев П.П., Регель В.Р. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 4. С. 1074-1079.

- [7] Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 301 с.
- [8] Агранат Б.А., Дубровин М.И., Хавский Н.Н., Эскин Г.И. Основы физики и техники ультразвука. М. Металлургия, 1989
- [9] Plesset M.S., Charman R.W. // J. Fluid Mech. 1971. V. 47. N. 2. P. 238-290.
- [10] Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.

Институт физики твердого тела РАН
Черноголовка
Московская область

Поступило в Редакцию
14 июля 1993 г.