

## Формування дислокаційної структури Cr – Mn – N сталей при деформуванні тиском та кавітації

С. Я. Шипицин, доктор технічних наук

Ю. З. Бабаскін, член-кореспондент НАН України

Т. В. Степанова

Л. І. Маркашова\*, доктор технічних наук, професор

М. Л. Валевиич\*, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

\*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

*Доведено доцільність використання залежностей формування дислокаційної структури при об'ємному механічному деформуванні для аналізу її формування при деформації в мікрооб'ємах металу при кавітаційному впливі. Встановлено, що при обох видах деформації в Cr – Mn – N – V сталі зі стабільним аустенітом з попереднім дисперсійним зміцненням деформаційне зміцнення здійснюється головним чином дислокаційним шляхом. Такий механізм деформаційного зміцнення забезпечує вищий рівень кавітаційної стійкості, ніж зміцнення за рахунок зсувного  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$  мартенситного перетворення в Cr – Mn – N сталі з нестабільним аустенітом.*

В роботі [1] досліджено можливість застосування економнолегованих Cr – Mn – N аустенітних сталей з дисперсійним нітридним зміцненням для потреб теплової та атомної енергетики, яка визначає нові високі параметри пару з температурою до 650 °C та тиску до 350 МПа, а також високий рівень довготривалої міцності і низької повзучості, високу корозійну та кавітаційну стійкість металу трубопроводів і запорно-регулюючої арматури [2].

Було встановлено, що для сталей з близьким рівнем легованості, зокрема аустенітних Cr – Mn – N із стабільним аустенітом (17X14Г19АФ) та нестабільним, схильним до зсувного  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$  мартенситного перетворення при деформуванні (17X14Г14АФ) (хімічний склад сталей наведено в табл. 1), на кавітаційну стійкість в більшій мірі, ніж ефективність

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей (% по масі)

Сталь	C	Si	Mn	Cr	V	N	Al	S	P
17X14Г14АФ	0,17	0,41	14,62	14,70	0,33	0,221	0,040	0,011	0,013
17X14Г19АФ	0,16	0,37	19,05	14,00	0,30	0,192	0,039	0,012	0,013

деформаційного зміцнення, впливає його механізм. Більш високий рівень кавітаційної стійкості та теплової стабільності деформаційного зміцнення сталей забезпечує дислокаційний механізм деформаційного зміцнення [3, 4], ніж зміцнення за рахунок зсувного  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$  перетворення. При близькій величині деформаційного зміцнення дислокаційне зміцнення забезпечує більш однорідне, ніж двійникові виділення  $\varepsilon$ -мартенситу, підвищення міцності в мікрооб'ємах металу без зниження пластичності за рахунок гальмування деформаційних дислокацій дисперсійною, некогерентною, нанорозмірною, статистично рівномірно розподіленою фазою, а також мало- та середньокутовими границями полігонізованої субструктури.

Дослідження ступеня і механізму деформаційного зміцнення в обох сталях проводили на циліндричних зразках діаметром 20 мм висотою 20 мм після їх стискання на пресі фірми BOLDVIN-100 при безперервному навантаженні зразків до заданого ступеня залишкової деформації. Ступінь деформаційного зміцнення зразків визначали за зміною їх твердості, а механізм зміцнення – за результатами рентгеноструктурного, металографічного, електронно-мікроскопічного трансмісійного на фольгах та скануючого аналізів.

Враховуючи, що максимальне напруження і деформація металу при стисненні досягається на половині висоти зразків [5], всі вказані характеристики визначали на поперечному перерізі зразків, отриманому електроіскровим різанням на половині їх висоти.

Встановлені в роботі [1] залежності ступеня деформаційного зміцнення сталей від характеристик дислокаційної структури металу при об'ємному стисненні апріорі використали для обґрунтування зміни кавітаційної стійкості сталей в залежності від механізму деформаційного зміцнення: зсувного  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$  мартенситного перетворення чи зміцнення за дислокаційним механізмом.

Однак відомо, що пластична деформація при стисненні в макрооб'ємах за величиною та характером може відрізнитися від цих показників при кавітаційній дії в мікрооб'ємах металу.

Тому, для підтвердження можливості використання залежностей формування дислокаційної структури при об'ємному механічному деформуванні для аналізу її формування при кавітаційному впливі, додатково дослідили методом електронно-мікроскопічного трансмісійного на фольгах аналізу дислокаційну структуру зразків сталі 17X14Г19АФ після деформування стисненням та кавітаційного зношування.

Зразки для дослідження на електронному мікроскопі JEM – 200 СХ (фірми “JEOL”, Японія) вирізали електроіскровим методом з кавітаційно-зношеної поверхні, виготовлення фольг проводили за методикою [6].

На рис. 1 наведені дислокаційні структури після деформації стисненням сталі 17X14Г19АФ зі стабільним до  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$  мартенситного перетворення аустенітом з попереднім його дисперсійним зміцненням нітридами ванадію, а на рис. 2 наведена структура цієї сталі з дисперсійним та з твердорозчинним зміцненням вуглецем, азотом та ванадієм після

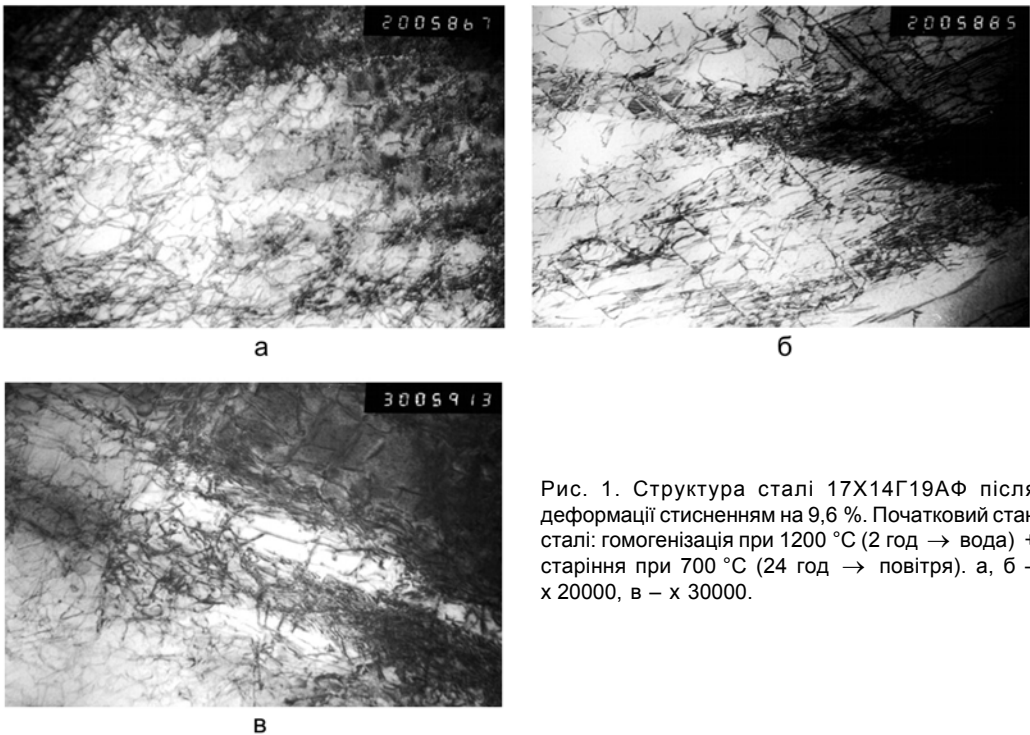


Рис. 1. Структура сталі 17X14Г19АФ після деформації стисненням на 9,6 %. Початковий стан сталі: гомогенізація при 1200 °С (2 год → вода) + старіння при 700 °С (24 год → повітря). а, б – х 20000, в – х 30000.

кавітаційного зношування. Дисперсійного зміцнення досягали старінням сталі при 700 °С (24 год) після гомогенізації при 1200 °С (2 год), а твердорозчинне – гомогенізацією без старіння.

Видно, що як при деформації стисненням, так і при кавітаційному зношуванні деформаційне зміцнення при макро- і мікродеформації досягається шляхом дислокаційного зміцнення. Формується майже однорідна сітка дислокацій, але їх щільність у випадку кавітаційного зношування суттєво менша, ніж при деформації стисненням. Це є наслідком меншого ступеня пластичної деформації в мікрооб'ємах у порівнянні із макродеформацією при стисненні в експерименті.

Відзначимо, що попереднє твердорозчинне зміцнення сталі не забезпечує ефективне деформаційне зміцнення в мікрооб'ємах металу при кавітаційному зношуванні (рис. 2 г, д, е).

Раніше встановлено [1], що хоча деформаційне зміцнення в макрооб'ємах за рахунок зсувного  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$  мартенситного перетворення при деформації стисненням більш ефективно, ніж зміцнення за дислокаційним механізмом, у випадку деформаційного зміцнення в мікрооб'ємах при кавітації воно поступається останньому, що видно за кавітаційною стійкістю зразків зі сталей зі стабільним та нестабільним аустенітом (табл. 2).

Це пов'язано з тим, що в сталі з нестійким аустенітом деформація веде до утворення ( $\epsilon \rightarrow \alpha$ ) мартенситу в двійниках та на дефектах упаковки в аустенітному зерні, а виділення мартенситу оточені малозміцненим з

## Фазові перетворення

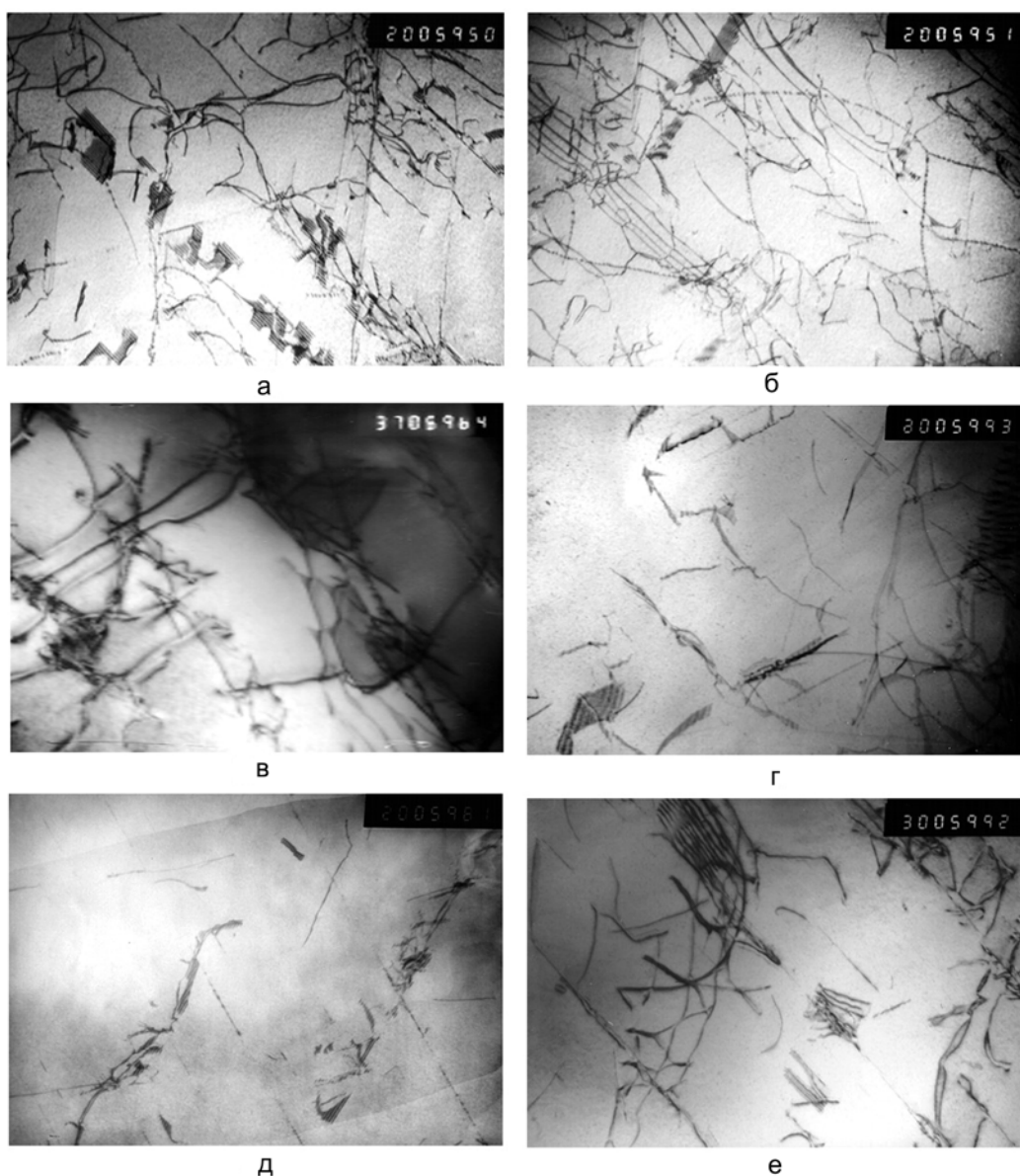


Рис. 2. Структура сталі 17Х14Г19АФ після кавітаційного зношування (21 год). Стан сталі: а, б, в – гомогенізація при 1200 °С (2 год → вода) + старіння при 700 °С (24 год → повітря), г, д, е – гомогенізація при 1200 °С (2 год → повітря). а, б, г, д – х 20000, в – х 37000, е – х 30000.

Таблиця 2

Втрата маси зразків після 20 год випробувань на кавітаційну стійкість

Сталь	Зміщення аустеніту	$\Delta P \times 10^2, \text{кг/м}^2$
17Х14Г14АФ	твердорозчинне	2,8
	дисперсійне	6,5
17Х17Г19АФ	твердорозчинне	2,3
	дисперсійне	1,5

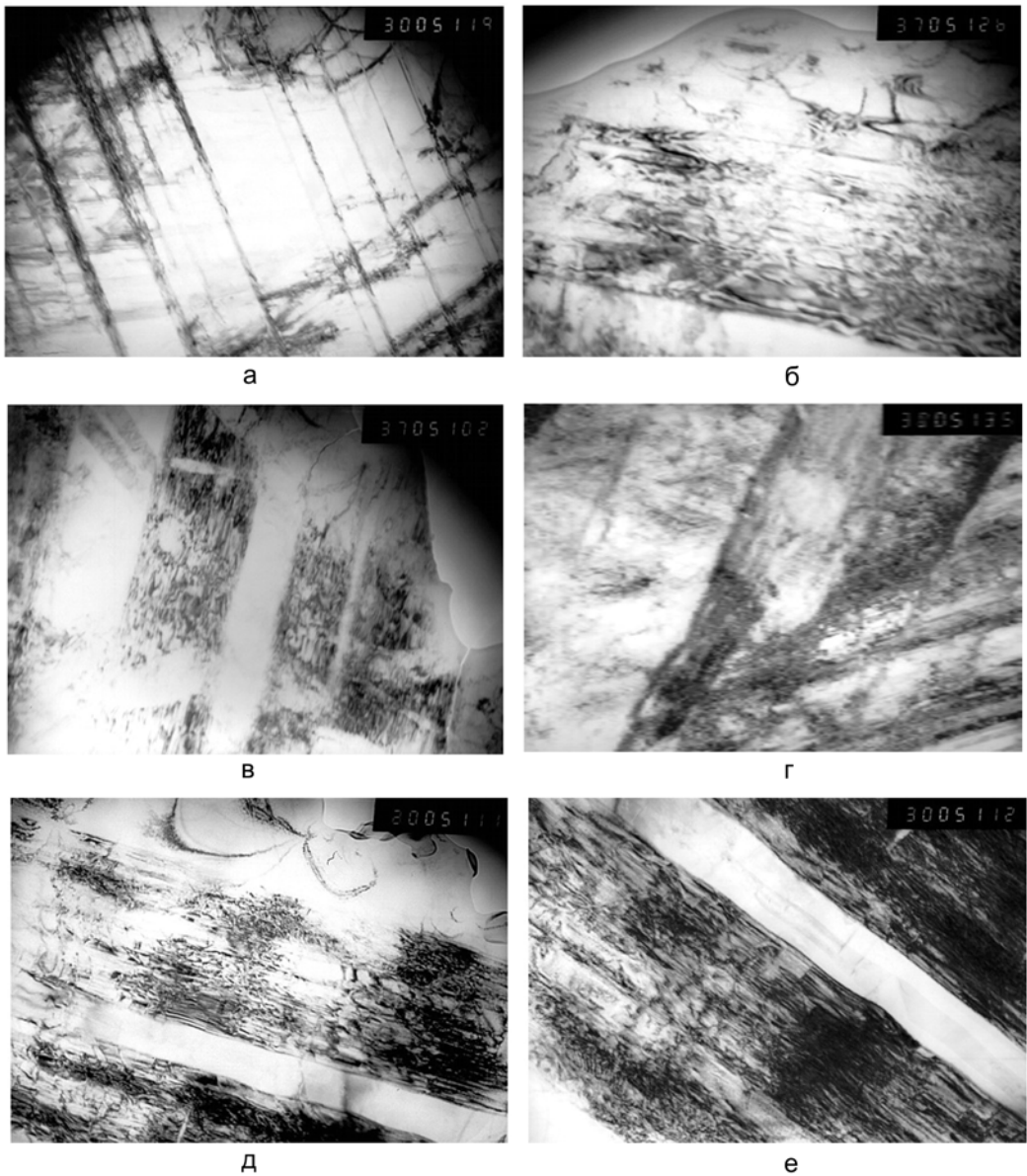


Рис. 3. Структура сталі 17X14Г14АФ після деформації стисненням на 12,0 – 15,4 %. Стан сталі: а, б – гомогенізація при 1200 °С; в, г – гомогенізація + старіння при 900 °С; д, е – гомогенізація + старіння при 700 °С. а, г, е – х 30000, д – х 20000, б, в – х 37000.

низькою щільністю дислокацій аустенітом (рис. 3). Ці об'єми не зміцненого аустеніту та їх границі є зародками кавітаційних каверн і об'ємами енергетично вигідними для їх прискореного розвитку (рис. 4).

Таким чином, доведено доцільність використання залежностей формування дислокаційної структури при об'ємному механічному деформуванні для аналізу її формування при деформації в мікрооб'ємах при кавітаційному впливі. Встановлено, що при обох видах деформації в

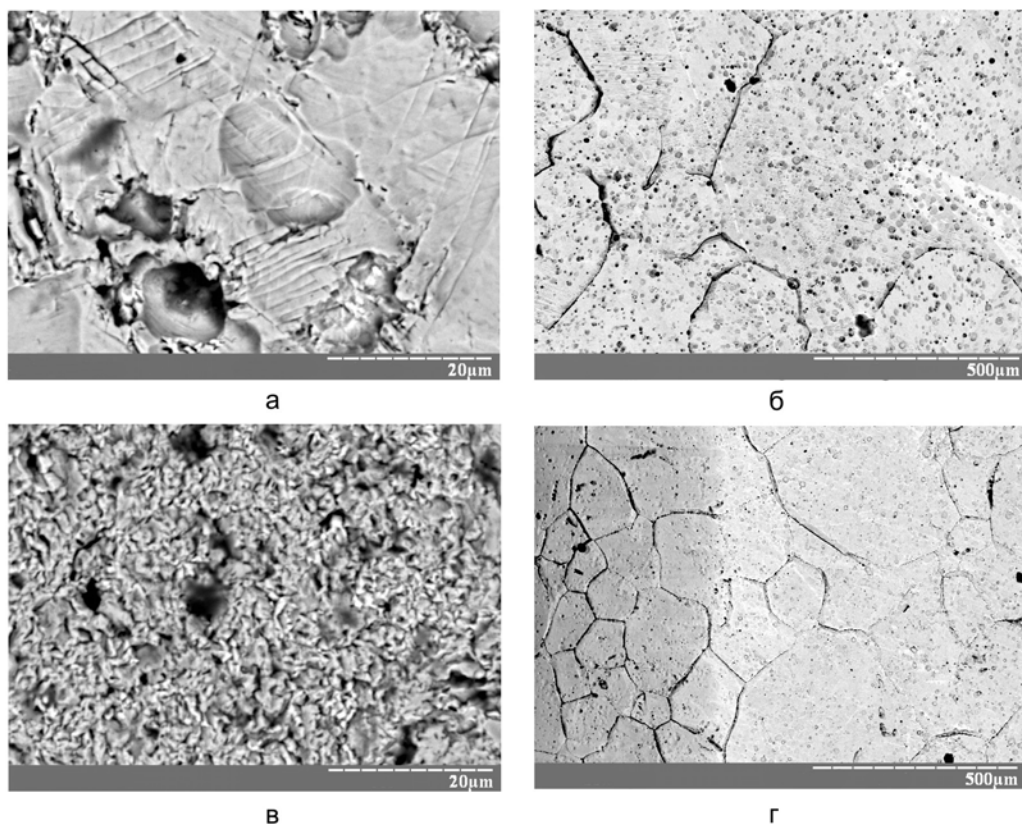


Рис. 4. Структура поверхні кавітаційного зносу зразків після 20 год випробувань. а, б, – сталь 17X14Г14АФ, в, г – сталь 17X14Г19АФ. Термообробка сталей: а, б – гомогенізація при 1200 °С, в, г – старіння при 700 °С.

сталі із стабільним аустенітом з попереднім дисперсійним зміцненням деформаційне зміцнення здійснюється насамперед шляхом дислокаційного зміцнення. Такий механізм деформаційного зміцнення забезпечує значно вищий рівень кавітаційної стійкості, ніж зміцнення за рахунок зсувного  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$  мартенситного перетворення в сталі з нестабільним аустенітом.

### Література

1. Шипицин С.Я., Лев І.Є., Маркашова Л.І. // *Металознавство та обробка металів*. – 2012. – 3. – С. 20 – 29.
2. Скоробогатых В.Н., Щенкова И.А., Козлов П.А. // *Арматуростроение*. – 2010. – 3 ( 66 ). – С. 56 – 59.
3. Cottrell A.H.. *Dislocations and plastic flow in crystals*, Oxford University Press, 1953. – P. 18. 46 – 4.
4. Orowan E. *Dislocations in Metal*. // *Trans. AIME*. – 1954. – 1. – Н. 69.
5. Беляев Н.М. *Сопротивление материалов*. – М.: ГИТТЛ, 1963. – 856 с.
6. Даровский Ю.Ф., Маркашова Л.И., Абрамов Н.П. // *Автоматическая сварка*. – 1985. – 12. – С. 60 – 63.

Одержано 02.06.14

С. Я. Шипицын, Ю. З. Бабаскин, Т. В. Степанова,  
Л. И. Маркашова, М. Л. Валевич

**Формирование дислокационной структуры Cr – Mn – N сталей  
при деформации давлением и кавитации**

**Резюме**

Доказана целесообразность использования зависимостей формирования дислокационной структуры при объемной механической деформации для анализа ее формирования при деформации в микрообъемах металла при кавитационном воздействии. Установлено, что при обоих видах деформации в Cr – Mn – N – V стали со стабильным аустенитом с предшествующим дисперсионным упрочнением деформационное упрочнение осуществляется путем дислокационного механизма. Такой механизм деформационного упрочнения обеспечивает более высокий уровень кавитационной стойкости, чем упрочнение за счет сдвигового  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$  мартенситного превращения в Cr – Mn – N стали с нестабильным аустенитом.

S. Ya. Shypytsyn, Yu. Z. Babaskin, T. V. Stepanova,  
L. I. Markashova, M. L. Valevich

**Formation of dislocation structure of Cr – Mn – N steels at  
deformation under pressure and cavitation**

**Summary**

The advisability of using the dependencies of formation of dislocation structure in the bulk mechanical deformation analysis of its formation during deformation of metal microvolumes at cavitation effects have proved. It was established that in both types of deformation in the Cr – Mn – N – V with the stable austenite steel with previous dispersion strengthening the deformation strengthening is carried out through the mechanism of dislocation. This mechanism of strain hardening provides higher stability than strengthening cavitation due to shift  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$  martensitic transformation in Cr – Mn – N steel with unstable austenite.