

Н.Г. Чаусов д-р техн.наук, А.П. Пилипенко канд.техн.наук, М.Н. Бондар канд.пед.наук,  
Е.М. Порохнюк  
Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г.Киев, Украина

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ НА КИНЕТИКУ РАЗРУШЕНИЯ ЛИСТОВОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С УЧЕТОМ ИМПУЛЬСНЫХ ПОДГРУЗОК

---

*Резюме. Встановлені відмінності кінетики руйнування листової нержавіючої сталі з центральним коловим отвором за статичного розтягу та за складного режиму навантаження – статичний розтяг з накладанням імпульсних підвантажень різної інтенсивності. У якості базового методу дослідження кінетики руйнування сталі використовували метод повних діаграм деформування.*

*The summary. The differences of fracture kinetics of a sheet stainless steel with a central circumferential hole under static tensile and under complex mode of loading - static tensile with imposition pulse loading of different intensity are detected. As a basic method of research of a fracture kinetics of steel have used a method of complete stress-strain softening diagrams.*

---

*Вступлення.* В реальных тонкостенных элементах конструкций зарождение и развитие макроразрушения чаще всего происходит в зонах концентрации напряжений, в которых напряженное состояние материала может существенно отличаться от условий нагружения вне этих зон. Данной проблеме исследований, в зависимости от типа нагружения, посвящено большое количество работ, например [1, 2].

Однако, до настоящего времени практически не проводили экспериментальных исследований кинетики разрушения листовых пластичных материалов с концентраторами при сложном режиме нагружения, который бы включал кратковременные импульсные подгрузки материала. Между тем установлено [3], что при наложении некоторых дополнительных ограничений на условия испытаний, механическое поведение материалов при одноразовых и многократных импульсных подгрузках полностью подпадает под поведение механических систем при динамических неравновесных процессах (хаотическая динамика). Как известно, в фундаментальных исследованиях брюссельской научной школы во главе с И.Пригожиным впервые было показано, что в условиях нелинейной динамики во всех физико-химических системах проходит процесс самоорганизации структуры, при котором в условиях значительного удаления от равновесия проявляются новые фундаментальные свойства вещества [4...6]. Специально проведенные опыты по влиянию импульсных подгрузок на процессы деформирования пластичных материалов показали [3, 7...9], что при динамических неравновесных процессах, связанных с резким обменом энергии между внешней средой и механической системой, может наблюдаться неустойчивость ранее созданной субструктуры и последующая структурная самоорганизация деформируемого объема материала в виде качественно отличающейся структуры, способствующей пластификации.

Проведенные физические исследования с использованием трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ) позволяют заключить, что пластификация материалов при динамических неравновесных процессах связана с образованием диссипативных структур в виде объемно-связанных, на разных масштабных уровнях, локализованных полос (каналов) [3, 7, 9]. Кроме того, был экспериментально зафиксирован поверхностный след образовавшейся диссипативной структуры в виде микро- и макроэкструзий [10], что позволяет сделать вывод о том, что диссипативные структуры являются структурами с более низкой плотностью, по сравнению с исходным материалом.

Следует также обратить внимание на то обстоятельство, что при воздействии на механическую систему серией последовательных импульсных подгрузок с возрастающей интенсивностью в исследуемом гладком образце материала (после неравновесных фазовых переходов) возникает множество упорядоченных структур (состояний материала), каждое из которых обладает новыми механическими свойствами, включая и характеристики трещиностойкости [3, 11]. Этот экспериментальный факт свидетельствует о том, что механические свойства материала в зоне концентрации напряжений после импульсных подгрузок различной интенсивности также могут изменяться в широком диапазоне. Причем изменение механических свойств в той или иной степени будет влиять на кинетику разрушения стали при последующем статическом растяжении.

*Целью* настоящей работы является получение дополнительной информации о смене механических характеристик листовой нержавеющей стали в зоне концентратора напряжений при действии импульсных подгрузок и их влиянии на кинетику разрушения стали.

*Методика эксперимента и результаты исследований*

Исследования проводили на плоских образцах из листовой нержавеющей стали шириной 20 мм и толщиной 1,5 мм. На рабочий участок образцов наносили концентратор напряжений в виде центрального кругового отверстия диаметром 1,4 мм.

Исследования кинетики разрушения стали проводили с использованием метода полных диаграмм деформирования [12, 13]. Известно, что с использованием данного метода удается реализовать такие условия испытаний, которые обеспечивают устойчивость процессов деформирования и разрушения на различных стадиях, в том числе, на стадии макроразрушения.

Для реализации динамических неравновесных процессов использован новый вид механических испытаний, описанный в работах [3, 7...10]. Процессы деформирования и разрушения материалов при импульсных подгрузках исследуются в составе механической системы, которая представляет собой простейшую статически неопределимую конструкцию в виде одновременно нагружаемых трех параллельных элементов: центрального образца из исследуемого материала и двух симметричных образцов – спутников, изготовленных из хрупкого материала. При нагружении этой конструкции заданной нагрузкой образцы-спутники разрушаются, и происходит импульсная подгрузка центрального образца в составе механической системы силой  $F_{имп.}$ . При этом следует учитывать следующий важный момент. По мере увеличения импульса воздействия на исследуемый материал возрастает падение напряжения в процессе «аномального» разупрочнения. И существует такое критическое значение импульса воздействия (средней скорости деформации в процессе нагружения) при заданной степени деформации, при котором образец материала в процессе импульсных подгрузок практически разделяется на две части [3].

В настоящем исследовании при заданной степени статической деформации 3...4% исследуемую сталь с концентратором напряжений подвергали импульсным подгрузкам различной интенсивности, практически до величины  $0,95 F_{имп.крит.}$

Для наглядности представления полученных данных, результаты испытаний представлены в виде сопоставления двух графиков, где кривая 1 соответствует результатам испытаний, стали при «чистом» статическом растяжении, а кривые 2...6 с учетом импульсных подгрузок различной интенсивности (рис.1).

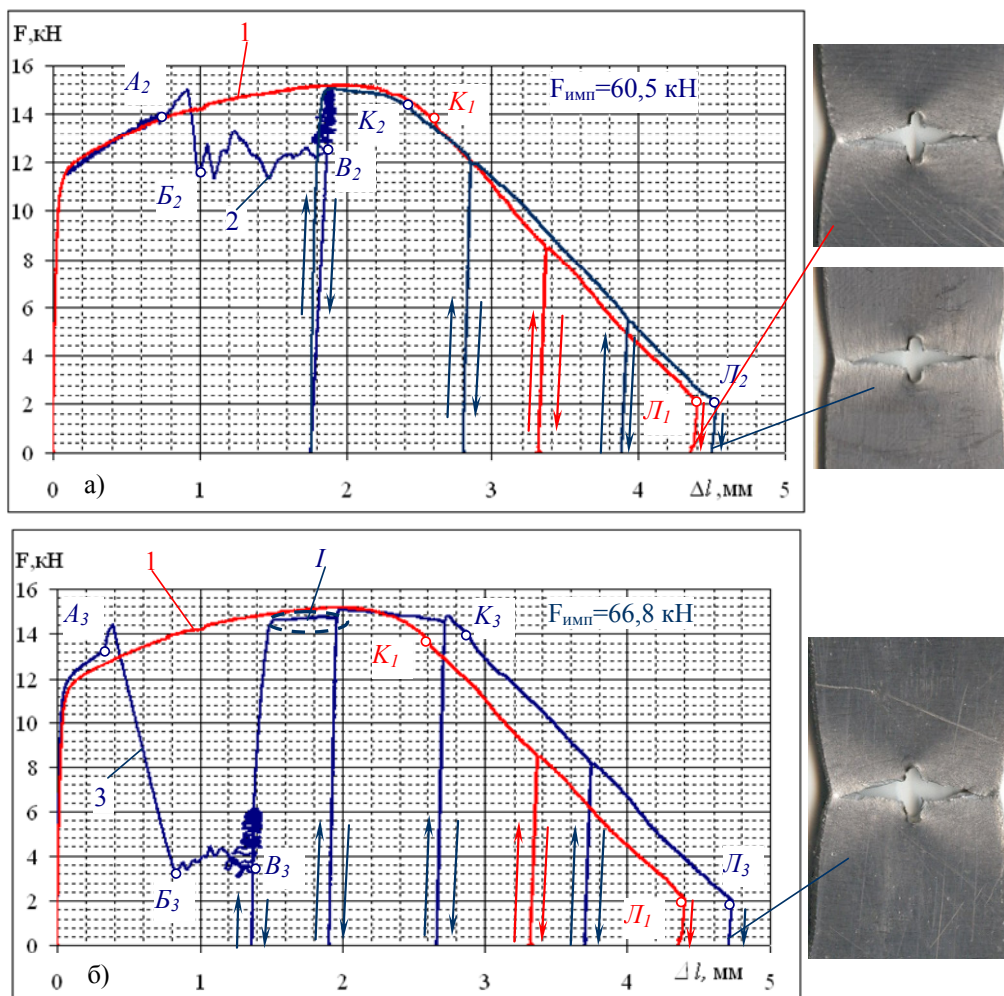
Анализ полученных результатов показывает, что наблюдается неоднозначное влияние заданных импульсных подгрузок на кинетику разрушения стали при последующем статическом растяжении. Это влияние, в первую очередь, определяется интенсивностью импульса воздействия на исследуемый материал. В первом приближении в качестве характеристики, учитывающей влияние импульсных подгрузок на последующую кинетику разрушения стали, можно принять уровень кратковременного разупрочнения материала при импульсных подгрузках (участки  $A_i B_i$  на рис.1). Тогда по результатам испытаний можно, по крайней мере, выделить три характерных типа воздействия на материал образца в зоне концентратора напряжений. Первый тип определяется уровнем разупрочнения стали до 20 %. При этом кинетика разрушения стали при сложном режиме нагружения практически не отличается от кинетики разрушения стали при статическом равновесном деформировании (см. рис. 1, а). Можно лишь отметить, что трещиностойкость стали при сложном режиме нагружения даже немного увеличилась

(сравни наклоны ниспадающих участков  $K_1L_1$  и  $K_2L_2$ ). Вероятно, это связано с тем, что образовавшаяся диссипативная полосовая структура, которая направлена преимущественно вдоль оси растяжения или под углом  $\sim 45^\circ$  [3, 7] является дополнительной преградой при росте трещины. Похожая ситуация отмечается и в случае, когда образцы подвергались двум последовательным импульсным подгрузкам (см. рис. 1, в). В данном случае уровень кратковременного разупрочнения материала (участок  $A_4B_4$ ) вырос до 33 %. Однако при незначительном уменьшении уровня деформации, при котором образуется макротрещина в зоне концентратора напряжений (сравни т.  $K_4$  и  $K_1$  на рис. 1), трещиностойкость стали наоборот повышается (сравни наклоны участков  $K_4L_4$  и  $K_1L_1$ ).

Второй характерный тип воздействия проявляется при уровне кратковременного разупрочнения стали до 76% (рис 1, б). При этом, при последующем статическом равновесном деформировании наблюдаются участки, подобные площадкам текучести (участок I на рис. 1, б) и сталь заметно пластифицируется. Характеристики трещиностойкости стали при этом практически не изменяются (сравни наклоны кривых  $K_3L_3$  и  $K_1L_1$ ).

Третий характерный тип воздействия проявляется, при уровне кратковременного разупрочнения стали до величин 84...95 % (рис. 1, г, д).

В данном случае сталь при импульсных подгрузках практически не пластифицируется, а при последующем нагружении, не смотря на наличие явных площадок, подобных площадкам текучести (области I на рис 1, г, д) проявляется склонность к резкому снижению деформационных способностей стали. Если при статическом растяжении образование трещины происходит при уровне деформации 16,25% (т.  $K_1$ ), то в случаях сложного нагружения, показанных на рис. 1, г, д, образование макротрещины происходит уже при уровне деформации 8,75% (см. т.  $K_5$  и  $K_6$ ). Интересно отметить, что трещиностойкость стали при исследуемых сложных режимах нагружения может даже увеличиться (сравни, например, наклоны кривых  $K_5L_5$  и  $K_1L_1$  на рис. 1, г).



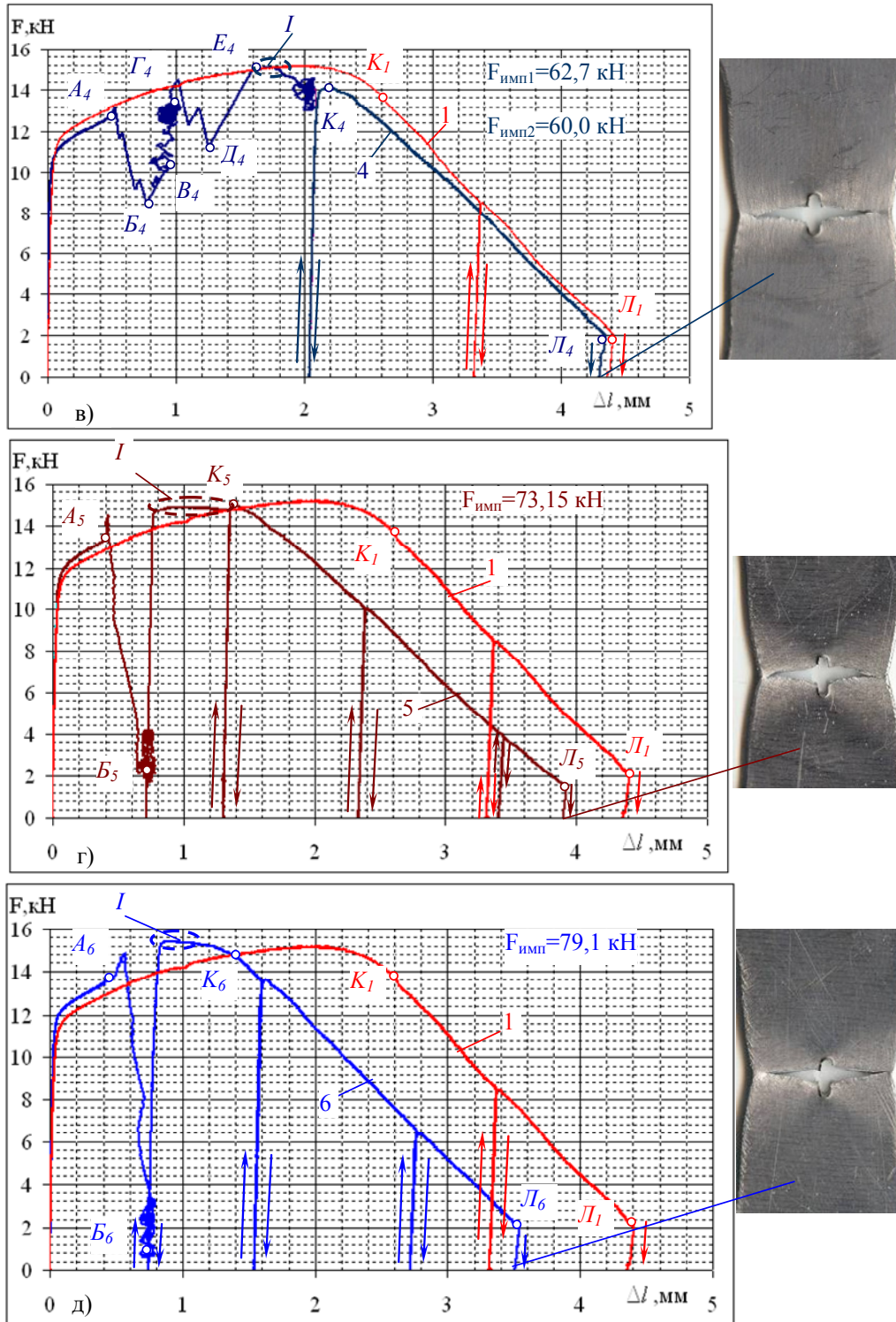


Рис. 1. Влияние импульсных подгрузок различной интенсивности на кинетику разрушения листовой нержавеющей стали в зоне концентратора: а...д, соответственно при  $F_{\text{имп}}=60,5; 66,8; 62,7$  и  $60,0; 73,15; 79,1$  кН

Проведенные исследования позволяют утверждать, что образующиеся в процессе импульсных подгрузок различной интенсивности в зоне концентратора напряжений диссипативные структуры способствуют повышению трещиностойкости стали. Этот факт заслуживает особого внимания и требует дальнейших исследований.

С другой стороны отмечается, резкое снижение деформационной способности стали в зоне концентратора напряжений в определенном диапазоне импульсных подгрузок. Это явление носит негативный характер.

*Выводы*

1. Впервые исследовано влияние импульсных подгрузок на деформирование и разрушение листовой нержавеющей стали в зоне концентратора напряжений.
2. Показано, что в зависимости от интенсивности импульса воздействия деформационные способности стали в зоне концентратора напряжений могут резко снижаться (в данных опытах приблизительно в 2 раза).
3. Установлено, что независимо от величины импульса воздействия характеристики трещиностойкости листовой нержавеющей стали практически всегда повышаются. Высказано предположение, что данный факт связан с образованием диссипативных полосовых структур в зоне концентратора напряжений, которые являются дополнительной преградой при росте макротрещины.

**Список литературы**

1. Прочность материалов и конструкций. Отв. ред. В.Т.Трощенко. – Киев: Академперіодика, 2005. – 1088с.
2. Трощенко В.Т., Стрижало В.А., Бородий М.В. Оценка долговечности металлических материалов в рамках деформационного критерия малоциклового усталости // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2008. - №4. - С.14-25.
3. Чаусов Н.Г., Засимчук Е.Э., Маркашова Л.И., Вильдеман В.Э., Турчак Т.В., Пилипенко А.П., Параца В.Н. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009 – 75. № 6. – С.52 – 59.
4. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение / Пер. с англ. Изд. 2-е, стереотипное. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 344с.
5. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках. / Пер. с англ. Изд. 2-е, доп. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 288с.
6. Глендсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973. – 273с.
7. Засимчук Е.Э., Маркашова Л.И., Турчак Т.В., Чаусов Н.Г., Пилипенко А.П., Параца В.Н. Особенности трансформации структуры пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения // Физическая мезомеханика. – 2009 – 12. № 2. – С.77 – 82.
8. Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Пилипенко А.П. Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. - № 3. – С.16 – 21.
9. Вплив багаторазових змін в режимі навантаження на деформування пластичних матеріалів. Чаусов М.Г., Лучко Й.Й., Пилипенко А.П. та інші. / Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. Збірник наукових праць. Львів. Каменяр. 2009, вип. 8. - С. 289-298.
10. Чаусов М.Г., Засимчук О.Е., Порохнюк К.М., Березін В.Б. Самоорганізація структури листового алюмінієвого сплаву при динамічних незрівноважених процесах // Праці Міжнародної науково-технічної конференції; 21-24 вересня 2009р., Тернопіль (Україна) / Відп. ред. В.Т. Трощенко. – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. Івана Пулюя, 2009. – С. 213 – 220.
11. Пилипенко А.П. Кінетика руйнування матеріалів з урахуванням впливу раптових змін в режимі навантаження. Автореф. дис. канд. техн. наук. Тернопіль, 2008. 20 с.
12. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. – Киев: Изд-во ИПП НАН Украины, 2004. – 133с.
13. Чаусов Н.Г. Полная диаграмма деформирования как источник информации о кинетике накопления повреждений и трещиностойкости материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004 – 70. № 7. – С.42 – 49.