Баранникова, С.А. Влияние концентраторов напряжений на кинетику полос локализованной пластической деформации / С.А. Баранникова. –DOI: 10.15593/perm.mech/2025.6.06 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 6. – С. 59–70.

Perm Polytech Style: Effect of Stress Concentrators on the Kinetics of Localized Plastic Deformation Bands. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 6, pp. 59–70. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.6.06

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 6, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.6.06
УДК 001.891.53

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ НА КИНЕТИКУ ПОЛОС ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

С.А. Баранникова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 22 августа 2025 г.
Одобрена: 11 декабря 2025 г.
Принята к публикации:
15 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

концентраторы напряжений, локализация пластической деформации, механические испытания, металлы

АННОТАЦИЯ

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния геометрических концентраторов напряжений на кинетику полос локализованной пластической деформации при одноосном растяжении плоских образцов поликристаллического технически чистого никеля. В качестве концентратора напряжений использовали центральное круговое отверстие различного диаметра. Диаграммы растяжения образцов демонстрируют прерывистую текучесть от предела текучести до формирования шейки. Показано, что на макроскопическом масштабном уровне пластическое течение протекает локализовано как в сплошных образцах, так и в образцах, ослабленных отверстием. Установлено, что концентратор напряжений на разных стадиях пластической деформации инициирует зарождение и распространение макроскопических полос деформации, взаимодействие которых может вызвать преждевременное разрушение материала. Методом корреляции цифровых спекл-изображений выявлены особенности движения полос локализованной пластической деформации в условиях прерывистой текучести. Показано, что скачки напряжений сопровождаются образованием морфологически простых одиночных полос локализованной деформации. Установлено, что с ростом общей деформации происходит уменьшение числа полос локализованной деформации и их скорости движения вдоль образца, в то время как временной период увеличивается. Проведено сравнение количественных параметров локализации пластической деформации в сплошных образцах и с концентратором напряжений. Установлено, что увеличение диаметра отверстия приводит к уменьшению числа полос локализованной пластической деформации в процессе растяжения образца. Предложены параметры, определяемые из временных зависимостей накопления деформации в очаге разрушения, которые могут быть использованы для оценки ресурса пластичности материала.

© **Баранникова Светлана Александровна**– доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории физики прочности, e-mail: bsa@ispms.ru

Svetlana A. Barannikova – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Leading Researcher, e-mail: bsa@ispms.ru).

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

EFFECT OF STRESS CONCENTRATORS ON THE KINETICS OF LOCALIZED PLASTIC DEFORMATION BANDS

S.A. Barannikova

Institute of Strength Physics and Material Science SB RAS, Tomsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 22 August 2025
Approved: 11 December 2025
Accepted for publication:
15 December 2025

Keywords:

stress concentrators, localization of plastic deformation, mechanical testing, metals

ABSTRACT

This work experimentally studies how geometric stress concentrators influence the kinetics of localized plastic deformation bands under uniaxial tension of flat specimens of polycrystalline commercially pure nickel. A central circular hole of various diameters was used as a stress concentrator. The tensile diagrams of the specimens demonstrate the jerky flow from the yield point to the neck formation. It is shown that at the macroscopic scale, plastic flow occurs in a localized manner both in solid specimens and in specimens weakened with a hole. It is established that the stress concentrator at various stages of plastic deformations initiates the nucleation and propagation of macroscopic deformation bands, the interaction of which can cause a premature failure of the material. The method of correlation of digital speckle images is used to reveal the features of the motion of localized plastic deformation bands under jerky flow conditions. It is shown that stress jumps are accompanied by the formation of morphologically simple single bands of localized deformation. It is established that with the growth of the total deformation there is a decrease in the number of localized deformation bands and their speed of movement along the sample, while the time period increases. A comparison of quantitative parameters of plastic deformation localization in solid samples and with a stress concentrator is carried out. It is established that an increase in the diameter of the hole leads to a decrease in the number of localized plastic deformation bands during the sample loading. Parameters determined from the time dependences of deformation accumulation in the necking site are proposed, which can be used to assess the plasticity resource of the material.

Введение

Локализация является одной из наиболее важных неразрывно связанных с протеканием процесса деформации особенностей пластического течения [1–4]. Природа локализации до сих пор не понята до конца, но универсальность этого эффекта сомнений не вызывает. Существует множество экспериментальных указаний на то, что локализация деформации наблюдается на любых масштабах процесса течения. Так, при теоретическом и экспериментальном [5] изучении развития пластической деформации при ударных нагрузках предсказано и экспериментально зарегистрировано возникновение подвижных фронтов локализованной пластичности. В работе [6] отмечено, что в процессе деформирования задолго до возникновения стационарной шейки образуются перемещающиеся по образцу зоны локализации деформации, названые «бегающими» шейками. Авторам удалось зафиксировать осцилляции локальных и максимальных скоростей деформации при растяжении с постоянной скоростью алюминия и его сплавов. В исследованиях нелинейных деформационных волн [7] было установлено, что на масштабе кристаллической решетки распространение высокоамплитудных упругих волн сопровождается их локализацией и формированием волновых особенностей из-за нелинейности упругой среды.

Наиболее важные особенности протекания деформации, сопровождающейся локализацией, недвусмысленно указывают, что в пластически деформируемой среде самопроизвольно возникают области, где в момент наблюдения сосредоточена (локализована) пластическая деформация. Это в полной мере соответствует образованию структуры, так что эффект локализации может рассматриваться как самоорганизация деформационного процесса [8], причем в деформируемом материале в исходном состоянии может не быть неоднородностей состава или структуры, с которыми можно было бы связать ее возникновение. Важность этой проблемы трудно переоценить, так как локализация пластической деформации нарушает необходимую для многих технологических процессов устойчивость пластического течения, делая недостижимой требуемую высокую степень пластичности до разрушения (запас пластичности) [9].

Классификация полос макроскопической локализованной деформации включает полосы Чернова – Людерса, полосы Портевена – Ле Шателье (ПЛШ), вызывающие прерывистую (скачкообразную) деформацию металлов и макрополосы в контуре шейки перед разрывом образца [10–13]. Приведенная классификация является в определенной мере условной, поскольку в реальных опытах наблюдается и различное сочетание этих трех типов [10]. Проявление эффекта прерывистой текучести при нагружении оказывается чувствительным к варьированию таких геометрических параметров как концентраторы напряжений [14]. Круговое отверстие является типовым концентратором напряжений для роторов дисков паровых турбин, подверженных в эксплуатации сложному термо-силовому нагружению, обуславливающему возникновение деформаций пластичности и ползучести [15–22]. Рассмотрение решения задач концентрации напряжений и деформаций в элементах конструкций традиционно начинается с задачи Кирша [23], в которой объектом расчетов является пластина с центральным отверстием при одноосном растяжении, и ее напряженно-деформированное состояние достаточно подробно изучено в упругой постановке и менее детально – при нелинейном деформировании [24]. Качественный анализ задачи в упругопластической постановке и результаты экспериментального моделирования приведены в монографии А. Надаи [25]. Эффективный численный метод решения с нахождением границы между упругой и пластической

областями описан в работе [26]. Приближенные подходы предложены в работах [27–29].

В настоящее время с позиции нелинейной динамики важно понимать механизм самопроизвольного формирования пространственно-временных (диссипативных) структур макроскопически локализованной пластической деформации в условиях нагружения образцов с концентраторами напряжений [14]. В работах [10; 29; 30] пластичность рассматривается как закономерное формирование и распространение в нагружаемом объекте автоволновых мод локализованной деформации, которые однозначно связаны со стадиями упрочнения, характерными для зависимости деформирующего напряжения от деформации. Механизм формирования автоволновых мод локализованной деформации связан с релаксацией концентраторов напряжений, которая играет в развитии процесса течения роль элементарного акта пластичности [30]. Для проверки были проведены опыты в условиях трехточечного изгиба [31], моделирующие формирование автоволн локализованного пластического течения вблизи концентратора макроскопического масштаба и позволяющие следить за процессом с использованием методики спекл-фотографии [29]. Исследование деформационного процесса в таких условиях [31] показало, что развитие пластической зоны у вершины трещины нормального отрыва происходит неоднородно как в пространстве образца, так и во времени. Наиболее важными являются данные о поведении материала в зоне пластической деформации вблизи концентратора, где соотношения линейной механики разрушения не выполняются и материал пластически деформируется. На примере распределений радиальной компоненты локальных деформаций показано [31], что в зоне пластичности перед концентратором напряжений рождается упорядоченная пространственно-периодическая система очагов деформации с расстоянием между максимумами ~ 2–3 мм и сложной структурой, меняющейся со временем. Размеры и форма пластической зоны эволюционируют по мере роста деформации. Распространение границы зоны пластичности близко по своей природе к фронтам полос Людерса, развивающимся на площадке текучести в материалах с резким пределом текучести. Полосы макроскопического сдвига могут тормозиться и исчезать в одних зонах, но возникать и развиваться в других, так что вместо равномерного движения фронта пластичности во всем полупространстве перед трещиной наблюдается скачкообразное перемещение его участков вследствие более сложного напряженного состояния в вершине трещины.

Как повлияет на автоволновые моды введение в материал концентратора напряжений в виде кругового отверстия, является одной из задач настоящего исследования. Большинство работ по исследованию явления прерывистой текучести выполнено при нагружении сплавов на основе Al и Mg [32–38], тем не менее литературные данные указывают на проявление прерывистой текучести в сплавах основе Ni [39–42]. Никелевые сплавы применяются в изделиях, устойчивых к широкому спектру агрессивных сред и обладают высокой степенью жаропрочности наряду с хорошей технологичностью, поэтому развитие представлений о макроскопической неоднородности пластического течения является объектом пристального изучения. Настоящая работа посвящена исследованию влияния концентраторов напряжений на процесс макроскопической локализации пластической деформации при одноосном растяжении технически чистого никеля.

Методы и материалы исследований

Исследования макроскопической локализации пластической деформации были выполнены образцах, вырезанных из холоднокатаного листа толщиной 2 мм поликристаллического никеля марки НП2 (чистотой менее 99,5%). Исходный размер зерна составлял 90 мкм. Плоские образцы с размерами рабочей части 50×10×2 мм растягивались на испытательной машине Walter+Bai LFM-125 со скоростью деформации $6{,}67 \cdot 10^{-5}$ $с^{-1}$ при комнатной температуре [43]. В качестве концентратора напряжений использовали центральное круговое отверстие с разным диаметром d (1 и 2 мм). Для снятия внутренних напряжений перед испытаниями образцы подвергались вакуумному отжигу при температуре 900 °С в течение 1 ч.

Механические характеристики исследуемых образцов поликристаллического Ni представлены в табл. 1. Ослабленные отверстием образцы демонстрируют снижение характеристик прочности и пластичности. На диаграммах растяжения σ(ε) после упругопластического перехода вплоть до момента разрушения заметны колебания деформирующего напряжения на стадии прерывистой текучести как для сплошных образов, так и для образцов с концентраторами напряжений (рис. 1).

Таблица 1/Table 1

Механические характеристики Ni

Mechanical properties of Ni

Образец	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение до разрыва, %
Без отверстия	70 ± 2	460 ± 2	54 ± 1
С отверстием d = 1 мм	62 ± 2	413 ± 2	30 ± 1
С отверстием d = 2 мм	60 ± 2	364 ± 2	23 ± 1

Скачки напряжений с ростом общей деформации достигают 1–5 МПа, природа которых обусловлена эффектом Портевена – Ле Шателье [2]. Анализ стадийности диаграмм растяжения выявил наличие стадий параболического деформационного упрочнения (с показателем параболичности n = 0,5) и предразрушения (n = 0,3), продолжительность которых уменьшается с ростом диаметра отверстия (рис. 1).

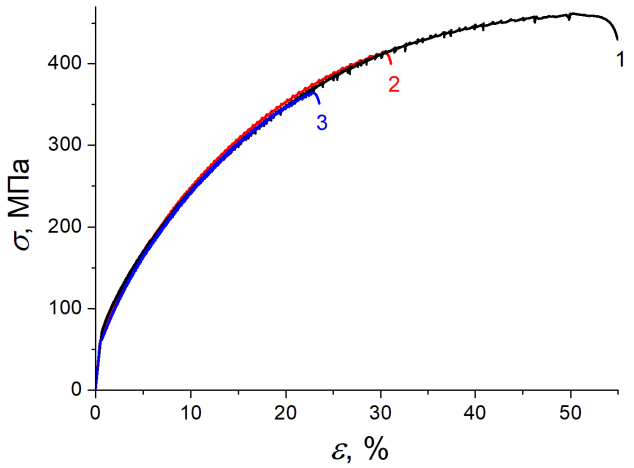


Рис. 1. Диаграммы растяжения образцов Ni (*1* – сплошной образец, *2* – образец с отверстием *d* = 1 мм, *3* – образец с отверстием *d* = 2 мм)

Fig. 1. Tensile diagrams of Ni samples (*1* – solid sample, *2* – sample with a hole *d* = 1 mm, *3* – sample with a hole *d* = 2 mm)

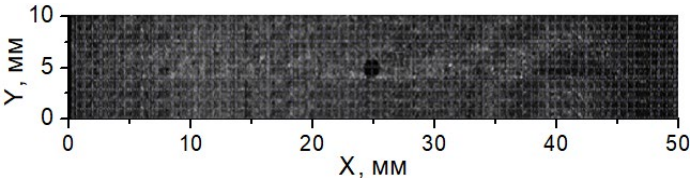


Рис. 2. Изображение рабочей поверхности образца с отверстием для измерения локальных деформаций (координаты центра отверстия *X* = 25 мм, *Y* = 5,5 мм)

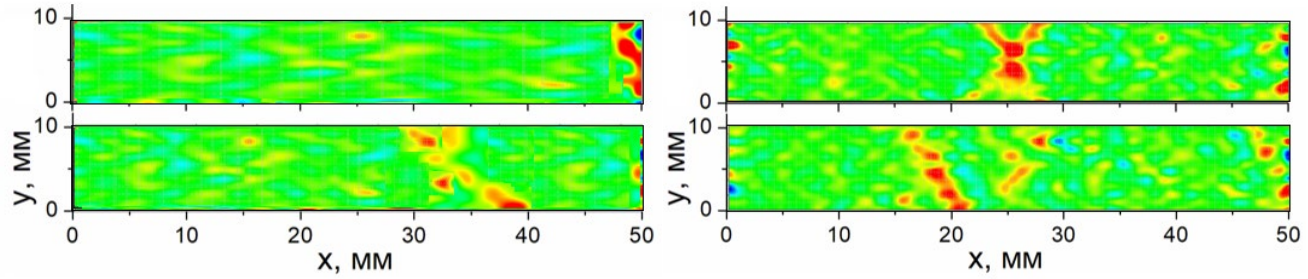
Fig. 2. Image of the working surface of the sample with a hole for measuring local deformations (coordinates of the hole center *X* = 25 mm, *Y* = 5.5 mm)

При исследовании полос локализованной пластической деформации нередко можно ограничиться выявлением зон локализации без определения абсолютных значений деформации в них. Для этих целей используются методы, основанные на регистрации изменений отражательной способности поверхности материала в ходе деформации, например, метод косого освещения для визуализации изменений рельефа, метод хрупких покрытий для визуализации локализаций деформации [44] и теневой оптический метод каустик для выявления градиентов напряжения. В большинстве случаев улучшить качество и эффективность визуализации можно, регистрируя не мгновенное состояние отражающей способности материала в кадре изображения, а разницу двух последовательных состояний, т. е. выполнив вычитание яркостей предыдущего кадра из следующего. Такой способ позволяет получить пространственное разрешение, равное разрешению оптического тракта; он доказал свою эффективность при использовании высокоскоростных цифровых камер для исследования скачкообразной деформации [45]. Очевидно, что разница двух последовательных изображений является информативной в случае, если эти изображения обладают достаточно высокой яркостной неоднородностью. Если за время между кадрами поверхность не изменила отражательную способность в точке наблюдения, а только претерпела локальные искажения в ее окрестностях, то визуализировать локализацию деформации не удастся. Проще всего эта проблему можно устранить созданием на поверхности высококонтрастной спекл-структуры [46]. Переход к цифровым системам регистрации и использование программных методов анализа изображений породили корреляцию цифровых изображений [44-49].

В данном исследовании визуализацию полос локализованной пластической деформации на рабочей части образцов осуществляли с помощью цифровой видеокамеры Point Grey FL3-GE-50S5M-C (с разрешением 2448×2048 пиксел) методом корреляции цифровых спекл-изображений [10, 50]. Метод основан на статистическом анализе кинетики спеклов в ходе изменения исследуемой поверхности объекта при освещении лазером с длиной волны 635 нм. В результате отражений от шероховатостей исследуемой поверхности образуется так называемая спекл-структура, выполняющая роль реперной сетки для измерения локальных деформаций (рис. 2). Скорость записи можно было варьировать в интервале от 2 до 25 кадров в секунду. Апостериорная обработка последовательности цифровых изображений позволяла зафиксировать фронты полос локализованной пластичности и визуализировать кинетику их движения путем построения хронограмм *X*-*t* (линейных зависимостей координат деформационных фронтов *X* от времени *t*) [29], по которым измеряли скорость движения фронтов деформации *V* и временно́й *T* период деформационного процесса (начало координат вдоль оси растяжения *X* = 0 мм соответствует неподвижному захвату испытательной машины).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

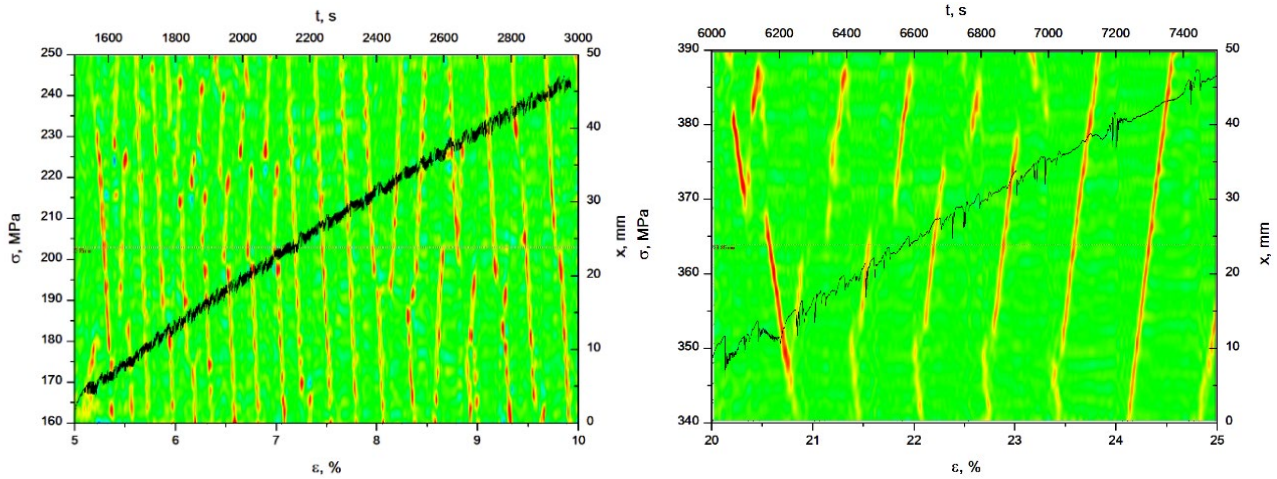
Несмотря на схожий качественный характер деформационного упрочнения сплошных образов и образцов с концентраторами напряжений, в закономерностях распространения фронтов локализованной деформации имеются отличия, подтверждающие концепцию о зарождении автоволн локализованной деформации на макроскопических концентраторах напряжений. На рис. 3 для стадии упругопластического перехода приведены парные картины с интервалом общей деформации 0,08 % распределений компоненты локальных удлинений на рабочей поверхности сплошного образца (рис. 3, *a*) и образца с отверстием (рис. 3, *b*). В сплошном образце зарождение полосы локализованной деформации происходит вблизи захвата испытательной машины (рис. 3, *a*), которая затем движется в направлении к противоположному захвату.



a *b*

Рис. 3. Распределение локальных деформаций: *a* – в образце Ni без концентратора напряжений, *b* – в образце с отверстием *d* = 2 мм, при общей деформации 0,2 % (верх) и 0,28 % (низ)

Fig. 3. Distribution of local deformations in a Ni sample without a stress concentrator (*a*) and in a sample with a hole *d* = 2 mm (*b*) at a total deformation of 0.2 % (top) and 0.28 % (bottom)



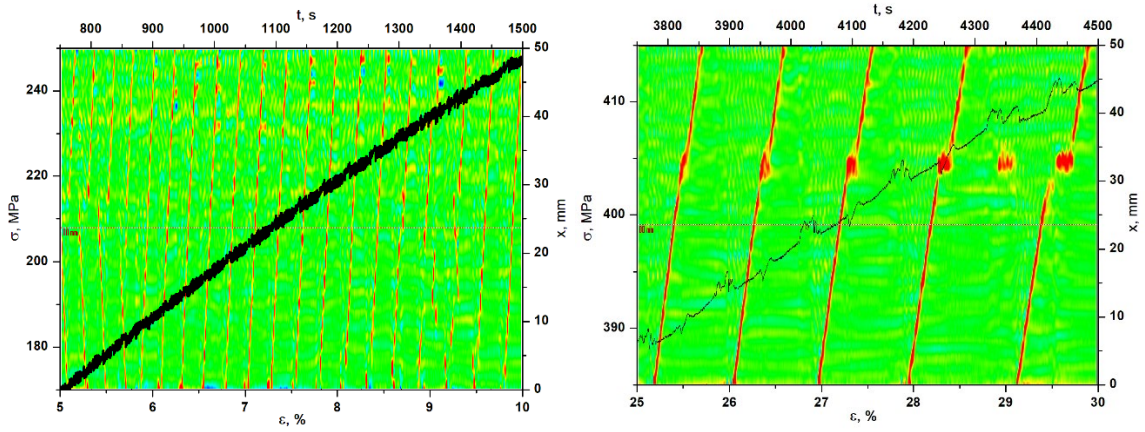
a *b*

Рис. 4. Совмещенные участки диаграммы растяжения с хронограммами движения полос ПЛШ для образца без концентратора напряжений в интервале деформаций: *a* – 5–10 %, *b* – 20–25 %

Fig. 4. Combined sections of the tensile stress diagram with chronograms of the movement of the PLS bands for a sample without a stress concentrator in the deformation range of 5–10 % (*a*) and 20–25 % (*b*)

Установлено, что во всех образцах скачкам напряжений на кривой пластического течения соответствует формирование полос ПЛШ [43]. Анализ хронограмм *X-t* для сплошного образца показал (рис. 4), что срывы напряжений при прерывистой текучести Ni сопровождаются образованием морфологически простых одиночных полос локализованной деформации ПЛШ [2], которые ранее наблюдалось при растяжении сплавов Al-Mg [32]. Когда полоса достигает захвата испытательной машины, деформирующее напряжение снова сбрасывается, и вблизи противоположного захвата формируется новая полоса, которая движется по образцу либо в таком же, либо в противоположном по отношению к предыдущему направлении с ростом общей деформации (рис. 4). После того, как и она достигает захвата испытательной машины, описанный процесс повторяется и продолжается при деформационном упрочнении Ni вплоть до разрушения (см. рис. 4). Скорость движения полос при этом снижается с 3 мм/с для первых фронтов локализованной деформации до 0,1 мм/с на стадии предразрушения. Разрушение сплошного образца произошло с образованием шейки, сформировавшейся вблизи неподвижного захвата.

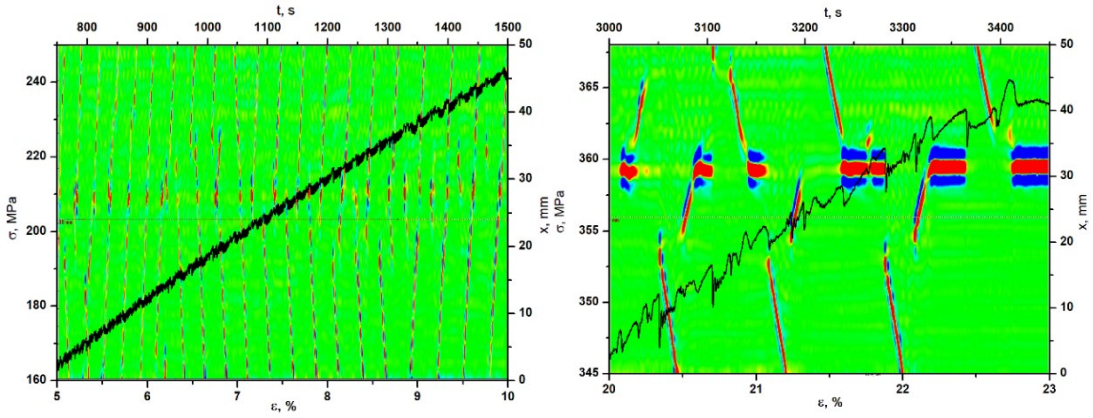
Центральное круговое отверстие (*d* = 1 мм) является макроскопическим концентратором напряжения, на котором в направлении максимальных касательных напряжений происходит формирование пары сопряженных локализованных полос деформации, реализующих упругопластический переход (рис. 3, *b*). Для релаксации такого концентратора напряжения после упругопластического перехода должно пройти по образцу два одиночных фронта, близких по своей природе к фронтам полос Людерса, наблюдаемых обычно в материалах с площадкой текучести. По мере роста внешнего напряжения степень концентрации напряжения постепенно падает и круговое отверстие малого диаметра перестают играть контролирующую роль в эволюции фронтов локализации деформации в условиях ПЛШ. Начиная с общей деформации 0,5 % наблюдается движение фронтов локализации деформации вдоль оси растяжения в направлении от подвижного к неподвижному захвату. Данные очаги движутся не зависимо от наличия концентратора напряжения, что видно на хронограммах *X*(*t*) на разных стадиях деформационного упрочнения, как и в случае сплошного образца (рис. 5). Скорость движения фронтов при этом снижается с 5 мм/с для первых фронтов до 0,5 мм/с на стадии предразрушения (см. рис. 5). Зарождение шейки и разрушение образца произошло в области концентратора напряжений.



a *b*

Рис. 5. Совмещенные участки диаграммы растяжения с хронограммами движения полос ПЛШ для образца с отверстием d = 1 мм, (*a*) – в интервале деформаций 5–10 %, (*b*) 25–30 %

Fig. 5. Combined sections of the tensile stress diagram with chronograms of the movement of the PLS strips for a sample with a hole d = 1 mm in the deformation range of 5–10 % (*a*) and 25–30 % (*b*)



a *b*

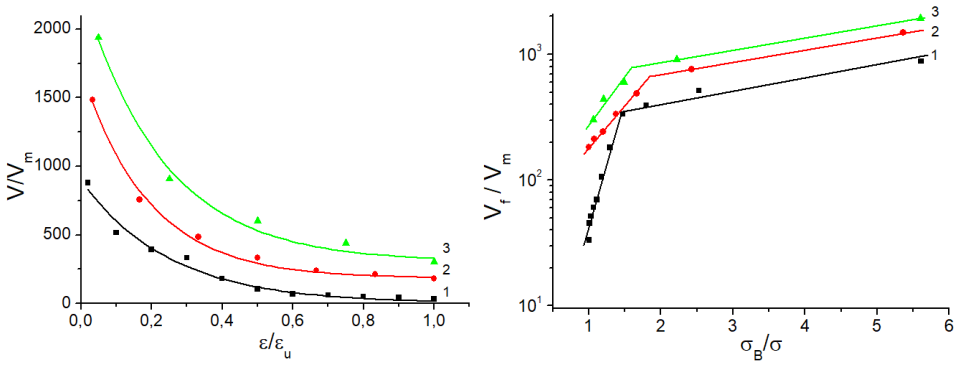
Рис. 6. Совмещенные участки диаграммы растяжения с хронограммами движения полос ПЛШ для образца с отверстием d = 2 мм, (*a*) – в интервале деформаций 5–10 %, (*b*) 20–23 %

Fig. 6. Combined sections of the tensile stress diagram with chronograms of the movement of the PLS strips for a sample with a hole d = 2 mm in the deformation range of 5–10 % (*a*) and 20–23% (*b*)

Как и в случае с меньшим диаметром отверстия, при увеличении диаметра в два раза (d = 2 мм), зарождение пары сопряженных локализованных полос деформации, реализующих упругопластический переход, также происходит вблизи концентратора напряжения. Однако для релаксации напряжений на таком концентраторе необходимо прохождение автоволн возбуждения в виде полос ПЛШ не только на упругопластическом переходе, но и участке упрочнения кривой нагружения. По мере роста внешнего напряжения степень концентрации напряжения не снижается и круговое отверстие большего диаметра уже играет контролирующую роль в эволюции фронтов локализации деформации (рис. 6).

Начиная с общей деформации 0,8 % наблюдается движение фронтов локализации деформации в направлении от захватов испытательной машины к отверстию. После того, как фронт достигает границы отверстия, описанный процесс повторяется и продолжается вплоть до разрушения (рис. 6). Скорость движения полос при этом случае снижается с 6 мм/с для первых фронтов локализованной деформации до 1 мм/с на стадии предразрушения. Зарождение шейки и разрушение образца произошло также в области концентратора напряжений.

Синхронная запись диаграмм растяжения и хронограмм позволяет получить зависимости скорости распространения V полос ПЛШ с ростом общей деформации ε или напряжения течения σ. Как следует из рис. 4-6, в исследованных образцах с ростом общей деформации происходит уменьшение количества полос локализованной деформации ПЛШ и их скорости движения вдоль оси образца. Поскольку наличие концентраторов напряжений приводит к изменению механических характеристик и параметров локализации деформации, то для сравнительного анализа экспериментальные данные представлены в относительных координатах: V/V_0 – $\varepsilon/\varepsilon_U$ (рис. 7, *a*) и V/V_0 – σ_B/σ (рис. 7, *b*), где V_0 – скорость движения подвижного захвата испытательной машины, σ_B и ε_U – напряжение и деформация, соответствующие пределу прочности.



a *b*

Рис. 7. Зависимости скорости распространения полос ПЛШ: (*a*) – с ростом общей деформации, (*b*) – с ростом напряжения течения в относительных координатах: *1* – сплошной образец; *2* – образец с отверстием *d* = 1 мм; *3* – образец с отверстием *d* = 2 мм

Fig. 7. Dependences of the propagation velocity of PLS stripes with an increase in total deformation (*a*) and flow stress (*b*) in relative coordinates: *1* – solid sample; *2* – sample with a hole *d* = 1 mm; *3* – sample with a hole *d* = 2 mm

Таблица 2/Table 2

Уравнения и коэффициенты аппроксимации для зависимостей скорости движения полос ПЛШ от деформации и напряжения течения

Equations and approximation coefficients for the dependence of the speed of movement of the PLC bands on the deformation and flow stress

Образец	Зависимость скорости движения полос ПЛШ от деформации $V = V_0 + V_3 \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}\right)$			Зависимость скорости движения полос ПЛШ от напряжения течения $V = V_2 + \frac{V_1 - V_2}{1 + \exp\left(\frac{\sigma - \sigma_1}{\sigma_2}\right)}$			
	V_0, мм/с	V_3, мм/с	ε_1, %	V_1, мм/с	V_2, мм/с	σ_1, МПа	σ_2, МПа
Без отверстия	0	2,98	12,5	14,15	–1,2	-204,03	278,5
С отверстием *d* = 1 мм	0,6	5,03	5,74	202,03	0,22	-415,4	131,52
С отверстием *d* = 2 мм	1	6,64	4,6	101,6	0,59	-253,88	113,85

Исследования закономерностей проявления эффекта ПЛШ в пластичном металле позволили установить экспоненциальную зависимость скорости движения полос ПЛШ V от деформации ε и сигмоидальную зависимость от напряжения течения σ (см. табл. 2).

Наличие концентратора напряжений и увеличение диаметра отверстия сопровождаются ростом скорости распространения одиночных полос локализованной пластической деформации в процессе растяжения образца по сравнению со сплошным образцом. Это обстоятельство указывает на возможность развития макроскопической локализации деформации даже при сравнительно невысоком уровне общей деформации номинально пластичного материала и нестабильном развитии этого процесса.

При исследовании процесса пластического течения не только фиксируются положения фронтов в пространстве образца и получаются их кинематические характеристики (см. рис. 3–6). В результате анализ картин локализованной пластичности позволяет дополнить информацию о механическом поведении материала характеристиками локализации пластического течения в нем на макромасштабном уровне. Скачкообразной диаграмме нагружения соответствует локализация пластической деформации, когда при каждом скачке напряжения наблюдается движение фронта деформации по всей длине образца (см. рис. 3–6). Обработка этих данных позволяет также получить локальную скорость продольной деформации в очаге разрушения ε^{loc}, а также амплитуды деформации в каждой полосе $d\varepsilon^{loc}/dt$ (рис. 8).

Проведенные эксперименты показали, что в образце с концентратором напряжений ($d = 2$ мм) произошло более чем двукратное снижение пластичности материала (см. рис. 1). Эволюция картин локализации деформации, сопровождающаяся возникновением высокоамплитудных зон локализации деформации ε^{loc}, проявляется как в сплошном образце (рис. 8), так и в образцах с отверстием. Следовательно, всегда можно определять времена их появления τ, где в дальнейшем образуется шейка и происходит разрушение. На рис. 9 приведены временные зависимости накопления деформации в очаге разрушения (будущей шейки образца) для исследованных образцов $\varepsilon^{loc}(t)$, где t – время нагружения. Данные зависимости отражают характер накопления поврежденности в процессе пластической деформации, который позволяет оценить времена постепенного развития повреждений τ (отмечены пунктирной линией) и роста трещины до критического размера τ^{cr}. В табл. 3 приведены значения характерных времен для всех исследованных образцов, которые могут быть использованы для оценки ресурса пластичности.

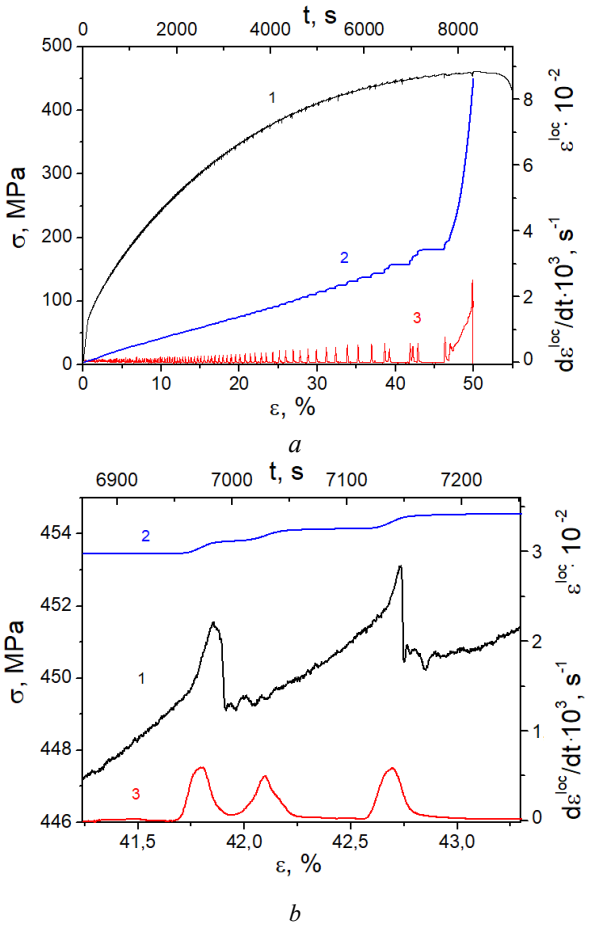


Рис. 8. Совмещенные диаграмма растяжения (*1*) с локальной скоростью деформации в очаге разрушения (*2*) и амплитудой деформации в каждой полосе (3), (*a*) - в интервале деформаций 0–50 %, (*b*) – подробнее в интервале деформаций масштабе 41–44 % (*b*) для образца без концентратора напряжений

Fig. 8. Combined tensile stress-strain diagram (*1*) with local strain rate in the fracture zone (*2*) and strain amplitude in each band (*3*) in the strain range of 0–50 % (*a*) and on an enlarged scale of 41–44 % (b) for a sample without a stress concentrator

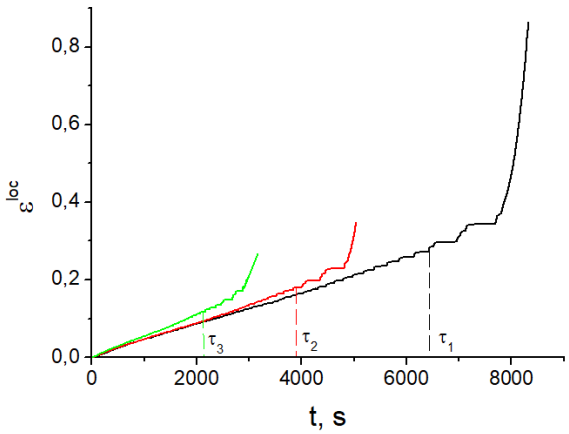


Рис. 9. Временные зависимости локальной скорости деформации в очаге разрушения: *1* – сплошной образец; *2* – образец с отверстием d = 1 мм; *3* – образец с отверстием d = 2 мм (τ_i – временной интервал постепенного развития повреждений)

Fig. 9. Time dependences of the local strain rate in the fracture focus: *1* – solid specimen; *2* – specimen with a hole d = 1 mm; *3* – specimen with a hole d = 2 mm (τi – times of gradual damage development)

Таблица 3/Table 3

Временные параметры для оценки ресурса пластичности материала
Time parameters for assessing the resource of plasticity of a material

Образец	Время постепенного развития повреждений, с	Время роста трещины, с	Время до разрушения, с
Без отверстия	6965 ± 2	1345 ± 2	8310 ± 2
С отверстием d = 1 мм	4342 ± 2	697 ± 2	5040 ± 2
С отверстием d = 2 мм	2649 ± 2	498 ± 2	3148 ± 2

Таким образом, время постепенного развития повреждений, соответствующее времени зарождения высокоамплитудной зоны локализации деформации – это параметр, по которому можно оценивать ресурс пластичности материала. Если τ_1 для сплошного образца принять за 100 %, то для образца с отверстием d = 1 мм τ_2 составляет 62 %, то есть выработка ресурса пластичности составляет 38 % и для образца с отверстием d =2 мм τ_3 составляет 38 %, то есть выработка ресурса пластичности металла составляет 62 % (рис. 9).

Заключение

В рамках настоящей работы установлено, что технически чистый никель, демонстрирующий эффект Портевена – Ле Шателье, очень чувствителен к геометрическим концентраторам напряжений в форме центральных круговых отверстий, которые инициируют зарождение и распространение через все поперечное сечение образца одиночных полос макроскопической деформации, взаимодействие которых может вызвать преждевременное разрушение материала. Полученные результаты и их анализ позволили установить, что в Ni упругопластический переход и деформационное упрочнение реализуется путем формирования автоволн локализованной деформации возбуждения в виде полос ПЛШ. Формирование автоволновых мод происходит на макроскопических концентраторах напряжений и развивается как релаксационный процесс. Для полной релаксации напряжений на концентраторах напряжений на соответствующих стадиях деформационного упрочнения должно сформироваться несколько автоволн локализованной пластичности, которые движутся в металле. Установлены зависимости скорости движения полос ПЛШ от общей деформации и напряжения течения. Наличие концентратора напряжений и увеличение диаметра отверстия сопровождаются снижением характеристик прочности и пластичности, а также увеличением скорости распространения полос локализованной пластической деформации в процессе растяжения образца по сравнению со сплошным образцом. Показано, что информация о макроскопической локализации деформации может быть использована для оценки ресурса пластичности элементов конструкций, содержащих концентраторы напряжений.

Библиографический список

1. Argon A. Strengthening Mechanisms in Crystal Plasticity. - Oxford: University Press, 2008. - 404 p.

2. Pelleg J. Mechanical Properties of Materials. - Dordrecht: Springer, 2013. - 634 p.

3. Kobayashi M. Analysis of deformation localization based on proposed theory of ultrasonic velocity propagation in plastically deformed solids // Int. J. Plasticity. - 2010. - Vol. 26, No. 1.- pp. 107–125.

4. Dequiedt J. L., Denoua C. Localization of plastic deformation in stretching sheets with a crystal plasticity approach: Competition between weakest link and instable mode controlled process // Int. J. Sol. Struct. - 2021. - Vol. 210–211, No. 1. - pp. 183–202.

5. Шестопалов Л. М. Деформирование металлов и волны пластичности в них. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1958. - 268 с.

6. Пресняков А. А., Мофа Н. Н. Локализация деформации алюминия и некоторых его сплавов при растяжении // Изв. АН СССР. Металлы. - 1981. - №2. С. 205–208.

7. Порубов А.В. Локализация нелинейных волн деформации. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 207 с.

8. Вигнер Е. Этюды о симметрии. - М.: Мир, 1971. - 318 с.

9. Заводчиков С.Ю., Зуев Л.Б., Котрехов В.А. Металловедческие вопросы производства изделий из сплавов циркония. - Новосибирск: Наука, 2012. - 255 с.

10. Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Лунев А.Г. От макро к микро. Масштабы пластической деформации. – Новосибирск: Наука, 2018. – 132 с.

11. Lebyodkin M.A., Zhemchuzhnikova D.A., Lebedkina T.A., Aifantis E.C. Kinematics of formation and cessation of type B deformation bands during the Portevin-Le Chatelier effect in an AlMg alloy // Res. Phys. – 2019. - Vol. 12. – pp. 867-869.

12. Трусов П.В., Чечулина Е.А. Методы и результаты исследования эффекта Портевена - Ле Шателье: эксперименты и макрофеноменологические модели // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 5. – С. 99-131.

13. Феклистова Е.В., Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Изучение влияния дискретизации области при разрушении тел с концентраторами напряжений // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2021. – Т. 2. – С. 215-218.

14. Шибков А.А., Федоров В.А., Золотов А.Е., Кочегаров С.С., Шибков Е.А., Желтова В.М. Формирование полос макролокализованной деформации вблизи концентраторов напряжения в алюминий-магниевом сплаве // Прикладная математика и физика. - 2024. – Т. 56, № 2. – С. 163–170.

15. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. - М.: Наука, 1981. – 141 с.

16. Lin X, Zhang L. and Xie Y. Research on the stress concentration effects and fracture mechanisms of DC04 sheet steel with holes // Front. Mater. - 2025. - Vol. 2. - pp. 1488624. doi: 10.3389/fmats.2025.1488624

17. Jafari,M., Ardalani E. Stress concentration in finite metallic plates with regular holes // Int. J. Mech. Sci. - 2016. - Vol. 106. – pp. 220–230. doi:10.1016/j.ijmecsci.2015.12.022

18. Kang J.-H. Exact solutions for stresses, strains, and displacements of a rectangular plate with an arbitrarily located circular hole subjected to inplane bending moment // Int. J. Mech. Sci. - 2014. - Vol. 89. – pp. 482–486. doi:10.1016/j.ijmecsci.2014.10.019

19. Luo L., Xiang Y., Wang Q. Stress concentration factor expression for tension strip with eccentric elliptical hole // Appl. Math. Mech. - 2012. - Vol. 33. - pp. 117–128. doi:10.1007/s10483-012-1537-7

20. Patel A., Desai C. K. Stress concentration around an elliptical hole in a large rectangular plate subjected to linearly varying in-plane loading on two opposite edges // Theor. Appl. Fract. Mech. - 2020. - Vol. 106. – P. 102432. doi:10.1016/j.tafmec.2019.102432

21. Tadepalli G., Gayatri Vineela M., Janardhan Reddy T.A. Analysis of stress concentration in isotropic and orthotropic plates with hole under uniformly distributed loading conditions // Mater. Today Proc. - 2017. - Vol. 4. - pp. 740–745. doi:10.1016/j.matpr.2017.01.080

22. Kirsch E.G. Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre // Zantr. Ver. Deut. Ing. - 1898. - Vol. 42. – pp. 797–807.

23. Шарафутдинов Г.З. Решение задачи Кирша в трехмерной постановке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1, Математика. Механика. - 2001. - № 6. - С. 20-25.

24. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. - М.: ИЛ. - 1954. - 648 с.

25. Tuba I.S. An analytic method for elastic-plastic solutions // Int. Sol. Struc. - 1967. - Vol. 3. - pp. 543-564.

26. Фаерберг И.И. Растяжение пластинки с круговым отверстием за пределом упругости // Тр. ЦАГИ. - 1947. - № 615. - С. 1-13.

27. Перлин П.И. Приближенный метод решения упруго-пластических задач // Инж. сб. - 1960. - Т. 28. - С. 145-150.

28. Leitman M., Villaggio P. Plastic Zone around Circular Holes // J. Eng. Mech. - 2009. - Vol. 135, No. 12. - pp. 1467–1471.

29. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. - Новосибирск: Наука, 2008. - 327 с.

30. Зуев Л.Б., Хон Ю.А. Пластическое течение как процесс формирования пространственно-временных структур. Ч. 1. Качественные и количественные закономерности // Физич. мезомех. - 2021. - Т. 24, №6. - С. 3–14.

31. Danilov V.I., Narimanova G.N., Zuev L.B. On evolution of plasticity zone in the vicinity of crack tip // Int. J. Fracture. - 2000. Vol. 101, No. 4. - pp. L35–L40.

32. Zhemchuzhnikova D., Lebyodkin M., Yuzbekovab D., Lebedkina T., Mogucheva A., Kaibyshev R. Interrelation between the Portevin Le-Chatelier effect and necking in AlMg alloys // Int. J. Plast. – 2018. - Vol. 110. - pp. 95-109. doi: 10.1016/j.ijplas.2018.06.012

33. Tamimi S., Andrade-Campos A., Pinho-da-Cruz J. Modelling the Portevin – Le Chatelier effects in aluminium alloys: a review // J. Mech. Behav. Mater. – 2015. - Vol.24, No. 3-4. - pp. 67-78. doi: 10.1515/jmbm-2015-0008

34. Reyne B., Manach P.-Y., Moës N. Macroscopic consequences of Piobert–Lüders and Portevin–Le Chatelier bands during tensile deformation in Al-Mg alloys // Mat. Sci. Eng. A. – 2019. - Vol.746. - pp. 187-196. doi: 10.1016/j.msea.2019.01.009

35. Mehenni M., Ait-Amokhtar H., Fressengeas C. Spatiotemporal correlations in the Portevin-Le Chatelier band dynamics during the type B – type C transition // Mat. Sci. Eng. A. – 2019. - Vol.756. - pp. 313-318. doi: 10.1016/j.msea.2019.04.036

36. Mäkinen T., Ovaska M., Laurson L., Alava M.J. Portevin–Le Chatelier effect: modeling the deformation bands and stress-strain curves // Mater. Theory. - 2022. - Vol. 6. - pp. 1-12. doi: 10.1186/s41313-022-00044-w

37. Kubin L.P., Estrin Y. The Portevin – Le Chatelier effect in deformation with constant stress rate // Acta Metall. – 1985. - Vol. 33. - pp. 397-407. doi: 10.1016/B978-0-08-031642-0.50062-3

38. Lebyodkin M., Dunin-Barkowskii L., Bréchet Y., Estrin Y., Kubin L.P. Spatio-temporal dynamics of the Portevin – Le Chatelier effect: experiment and modelling // Acta mater. – 2000. - Vol.48, No. 10. - pp. 2529-2541. doi: 10.1016/S1359-6454(00)00067-7

39. Fernandez-Zelaia P., Adair B.S., Barker V.M., Antolovich S.D. The Portevin-Le Chatelier Effect in the Ni-Based Superalloy IN100 // Metall. Mater. Trans. A. – 2015. – Vol. 46. – pp. 5596–5609.

40. Cui C., Zhang R., Zhou Y., Sun X. Portevin – Le Châtelier effect in wrought Ni-based superalloys: Experiments and mechanisms // J. Mater. Sci. Technol. – 2020. - Vol.51. - pp. 16-31. doi: 10.1016/j.jmst.2020.03.023

41. Cai Y., Tian C., Fu S., Han G., Cui C., Zhang Q. Influence of γ′ precipitateson Portevin–Le Chatelier effect of NI-based superalloys // Mater. Sci. Eng. A. – 2015. - Vol. 638. - pp. 314-321. doi: 10.1016/j.msea.2015.04.033

42. Rowlands B.S., Rae C., Galindo-Nava E. The Portevin – Le Chatelier effect in nickel-base superalloys: Origins, consequences and comparison to strain ageing in other alloy systems // Prog. Mater. Sci. – 2023. - Vol. 132. – P. 101038. doi: 10.1016/j.pmatsci.2022.101038

43. Надежкин М.В., Баранникова С.А. Влияние скорости нагружения на кинетику полос локализации пластической деформации в никеле // Изв. вуз. Физика. – 2021. – Т. 64, № 8(765). – С. 38-42.

44. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. Справочник. - М.: Машиностроение, 1983. - 248 с.

45. Shibkov A.A., Gasanov M. F., Zheltov M.A., Zolotov A.E., Ivolgin V.I. Intermittent plasticity associated with the spatio-temporal dynamics of deformation bands during creep tests in an AlMg polycrystal // Int. J. Plasticity. - 2016. - Vol. 86, №8.- pp. 37–55.

46. Shabadi R., Kumar S., Roven H.J., Dwarakadasa E.S. Characterisation of PLC band parameters using laser speckle technique // Mater. Sci. Eng. A. - 2004. Vol. 364. - pp. 140–150.

47. Réthoré J., Leygue A., Coret M., Stainier L., Verron E.. Computational measurements of stress fields from digital images // Int. J. Num. Meth. Eng. – 2018. – Vol. 113 (12). - pp. 1810-1826. doi:10.1002/nme.5721.hal-01454432v3

48. Besnard G, Hild F, Roux S. Finite-element displacement fields analysis from digital images: application to Portevin–Le Châtelier bands // Exp Mech. - 2006. - Vol. 46(6). - pp. 789-803.

49. Hild F., Roux S. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties—a review // Strain. - 2006. - Vol. 42(2). - pp. 69-80.

50. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analysis // Measure Sci. Technol. - 2010. - Vol. 21. - pp. 054014: 1–5.

References

1. Argon A. Strengthening Mechanisms in Crystal Plasticity. Oxford: University Press, 2008, 404 p.

2. Pelleg J. Mechanical Properties of Materials. Dordrecht: Springer, 2013, 634 p.

3. Kobayashi M. Analysis of deformation localization based on proposed theory of ultrasonic velocity propagation in plastically deformed solids, *Int. J. Plasticity*., 2010, Vol. 26, No. 1, pp. 107–125.

4. Dequiedt J. L., Denoua C. Localization of plastic deformation in stretching sheets with a crystal plasticity approach: Competition between weakest link and instable mode controlled process*, Int. J. Sol. Struct*., 2021, Vol. 210–211, No. 1, pp. 183–202.

5. Shestopalov L. M. Deformirovanie metallov i volny plastichnosti v nih [Deformation of metals and plasticity waves in them]. M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1958, 268 p.

6. Presnjakov A. A., Mofa N. N. Lokalizacija deformacii aljuminija i nekotoryh ego splavov pri rastjazhenii [Localization of deformation of aluminum and some of its alloys under tension]. *Izv. AN SSSR. Metally*,1981, No. 2, pp. 205–208.

7. Porubov A.V. Lokalizacija nelinejnyh voln deformacii [Localization of nonlinear deformation waves]. M.: FIZMATLIT, 2009, 207 p.

8. Vigner E. Jetjudy o simmetrii [Studies on Symmetry]. M.: Mir, 1971, 318 p.

9. Zavodchikov S.Ju., Zuev L.B., Kotrehov V.A. Metallovedcheskie voprosy proizvodstva izdelij iz splavov cirkonija [Metallographic issues of production of products from zirconium alloys]. Novosibirsk, Nauka, 2012, 255 p.

10. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G. Ot makro k mikro. Masshtaby plasticheskoj deformacii [From macro to micro. Scales of plastic deformation]. Novosibirsk, Nauka, 2018, 132 p.

11. Lebyodkin M.A., Zhemchuzhnikova D.A., Lebedkina T.A., Aifantis E.C. Kinematics of formation and cessation of type B deformation bands during the Portevin-Le Chatelier effect in an AlMg alloy, *Res. Phys.*, 2019, Vol. 12, pp. 867-869.

12. Trusov P.V., Chechulina E.A. Methods and results of studying the Portevin – Le Chatelier effect: experiments and macrophenomenological models. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, No. 5, pp. 99-131. doi: 10.15593/perm.mech/2023.5.09

13. Feklistova E.V., Vil'deman V.Je., Tret'jakov M.P. Izuchenie vlijanija diskretizacii oblasti pri razrushenii tel s koncentratorami naprjazhenij [Study of the influence of domain discretization during the destruction of bodies with

stress concentrators]. *Ajerokosmicheskaja tehnika, vysokie tehnologii i innovacii*, 2021, Vol. 2, pp. 215-218.

14. Shibkov A.A., Fedorov V.A., Zolotov A.E., Kochegarov S.S., Shibkov E.A., Zheltova V.M. Formirovanie polos makrolokalizovannoj deformacii vblizi koncentratorov naprjazhenija v aljuminij-magnievom splave [Formation of macrolocalized deformation bands near stress concentrators in an aluminum-magnesium alloy]. *Prikladnaja matematika i fizika*, 2024, Vol.. 56, No. 2, pp. 163–170.

15. Mavljutov R.R. Koncentracija naprjazhenij v jelementah aviacionnyh konstrukcij [Stress concentration in elements of aircraft structures]. M.: Nauka, 1981, 141 p.

16. Lin X, Zhang L., Xie Y. Research on the stress concentration effects and fracture mechanisms of DC04 sheet steel with holes, *Front. Mater.,* 2025, Vol. 2., pp. 1488624. doi: 10.3389/fmats.2025.1488624

17. Jafari,M., Ardalani E. Stress concentration in finite metallic plates with regular holes, *Int. J. Mech. Sci*., 2016, Vol. 106, pp. 220–230. doi:10.1016/j.ijmecsci.2015.12.022

18. Kang J.-H. Exact solutions for stresses, strains, and displacements of a rectangular plate with an arbitrarily located circular hole subjected to inplane bending moment*, Int. J. Mech. Sci*., 2014, Vol. 89, pp. 482–486. doi:10.1016/j.ijmecsci.2014.10.019

19. Luo L., Xiang Y., Wang Q. Stress concentration factor expression for tension strip with eccentric elliptical hole, *Appl. Math. Mech*., 2012, Vol. 33, pp. 117–128. doi:10.1007/s10483-012-1537-7

20. Patel A., Desai C. K. Stress concentration around an elliptical hole in a large rectangular plate subjected to linearly varying in-plane loading on two opposite edges, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2020, Vol. 106, P. 102432. doi:10.1016/j.tafmec.2019.102432

21. Tadepalli G., Gayatri Vineela M., Janardhan Reddy T.A. Analysis of stress concentration in isotropic and orthotropic plates with hole under uniformly distributed loading conditions, *Mater. Today Proc*., 2017, Vol. 4, pp. 740–745. doi:10.1016/j.matpr.2017.01.080

22. Kirsch E.G. Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre, *Zantr. Ver. Deut. Ing.*, 1898, Vol. 42, pp. 797–807.

23. Sharafutdinov G.Z. Reshenie zadachi Kirsha v trehmernoj postanovke [Solution of the Kirsch problem in a three-dimensional formulation]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 1, Matematika. Mehanika*, 2001, No. 6, pp. 20-25.

24. Nadai A. Plastichnost' i razrushenie tverdyh tel [Plasticity and fracture of solids]. M.: IL, 1954, 648 p.

25. Tuba I.S. An analytic method for elastic-plastic solutions, *Int. Sol. Struc*., 1967, Vol. 3, pp. 543-564.

26. Faerberg I.I. Rastjazhenie plastinki s krugovym otverstiem za predelom uprugosti [Stretching of a plate with a circular hole beyond the elastic limit]. *Tr. CAGI*., 1947, Vol. 615, pp. 1-13.

27. Perlin P.I. Priblizhennyj metod reshenija uprugoplasticheskih zadach [Approximate method for solving elastic-plastic problems]. *Inzh. sb.,* 1960, Vol. 28, pp. 145-150.

28. Leitman M., Villaggio P. Plastic Zone around Circular Holes, *J. Eng. Mech*., 2009, Vol. 135, No. 12, pp. 1467–1471.

29. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. Fizika makrolokalizacii plasticheskogo techenija [Physics of macrolocalization of plastic flow]. Novosibirsk, Nauka, 2008, 327 p.

30. Zuev L.B., Hon Ju.A. Plasticheskoe techenie kak process formirovanija prostranstvenno-vremennyh struktur. Ch. 1. Kachestvennye i kolichestvennye zakonomernosti [Plastic flow as a process of formation of spatio-temporal structures. Part 1. Qualitative and quantitative patterns]. *Fizich. mezomeh*., 2021, Vol. 24, No. 6, pp. 3–14.

31. Danilov V.I., Narimanova G.N., Zuev L.B. On evolution of plasticity zone in the vicinity of crack tip, *Int. J. Fracture*, 2000., Vol. 101, No. 4, pp. 35–40.

32. Zhemchuzhnikova D., Lebyodkin M., Yuzbekovab D., Lebedkina T., Mogucheva A., Kaibyshev R. Interrelation between the Portevin Le-Chatelier effect and necking in AlMg alloys, *Int. J. Plast*., 2018, Vol. 110, pp. 95-109. doi: 10.1016/j.ijplas.2018.06.012

33. Tamimi S., Andrade-Campos A., Pinho-da-Cruz J. Modelling the Portevin – Le Chatelier effects in aluminium alloys: a review, *J. Mech. Behav. Mater*., 2015, Vol.24, No. 3-4, pp. 67-78. doi: 10.1515/jmbm-2015-0008

34. Reyne B., Manach P.-Y., Moës N. Macroscopic consequences of Piobert–Lüders and Portevin–Le Chatelier bands during tensile deformation in Al-Mg alloys, *Mat. Sci. Eng. A*., 2019, Vol.746, pp. 187-196. doi: 10.1016/j.msea.2019.01.009

35. Mehenni M., Ait-Amokhtar H., Fressengeas C. Spatiotemporal correlations in the Portevin-Le Chatelier band dynamics during the type B – type C transition, *Mat. Sci. Eng. A*., 2019, Vol.756, pp. 313-318. doi: 10.1016/j.msea.2019.04.036

36. Mäkinen T., Ovaska M., Laurson L., Alava M.J. Portevin–Le Chatelier effect: modeling the deformation bands and stress-strain curves, *Mater. Theory*, 2022, Vol. 6, pp. 1-12. doi: 10.1186/s41313-022-00044-w

37. Kubin L.P., Estrin Y. The Portevin – Le Chatelier effect in deformation with constant stress rate, *Acta Metall*., 1985, Vol. 33, pp. 397-407. doi: 10.1016/B978-0-08-031642-0.50062-3

38. Lebyodkin M., Dunin-Barkowskii L., Bréchet Y., Estrin Y., Kubin L.P. Spatio-temporal dynamics of the Portevin – Le Chatelier effect: experiment and modelling, *Acta mater*., 2000, Vol.48, No. 10, pp. 2529-2541. doi: 10.1016/S1359-6454(00)00067-7

39. Fernandez-Zelaia P., Adair B.S., Barker V.M., Antolovich S.D. The Portevin-Le Chatelier Effect in the Ni-Based Superalloy IN100, *Metall. Mater. Trans. A*, 2015*,* Vol. 46, pp. 5596–5609.

40. Cui C., Zhang R., Zhou Y., Sun X. Portevin – Le Châtelier effect in wrought Ni-based superalloys: Experiments and mechanisms, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2020, Vol.51, pp. 16-31. doi: 10.1016/j.jmst.2020.03.023

41. Cai Y., Tian C., Fu S., Han G., Cui C., Zhang Q. Influence of γ′ precipitateson Portevin–Le Chatelier effect of NI-based superalloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 2015, Vol. 638, pp. 314-321. doi: 10.1016/j.msea.2015.04.033

42. Rowlands B.S., Rae C., Galindo-Nava E. The Portevin – Le Chatelier effect in nickel-base superalloys: Origins, consequences and comparison to strain ageing in other alloy systems, *Prog. Mater. Sci.,* 2023, Vol. 132, p. 101038. doi: 10.1016/j.pmatsci.2022.101038

43. Nadezhkin M.V., Barannikova S.A. Effect of loading rate on kinetics of plastic deformation localization bands in nickel, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*

Fizika, 2021, Vol. 64, No. 8(765), pp. 38-42. doi: 10.17223/00213411/64/8/38

44. Prigorovskij N.I. Metody i sredstva opredelenija polej deformacij i naprjazhenij. Spravochnik [Methods and means for determining deformation and stress fields]. M.: Mashinostroenie, 1983, 248 p.

45. Shibkov A.A., Gasanov M. F., Zheltov M.A., Zolotov A.E., Ivolgin V.I. Intermittent plasticity associated with the spatio-temporal dynamics of deformation bands during creep tests in an AlMg polycrystal, *Int. J. Plasticity*, 2016. Vol. 86, No. 8, pp. 37–55.

46. Shabadi R., Kumar S., Roven H.J., Dwarakadasa E.S. Characterisation of PLC band parameters using laser speckle technique, *Mater. Sci. Eng. A*, 2004, Vol. 364, pp. 140–150.

47. Réthoré J., Leygue A., Coret M., Stainier L, Verron E. Computational measurements of stress fields from digital images, *Int. J. Num. Meth. Eng.,* 2018, Vol. 113 (12), pp. 1810-1826. doi:10.1002/nme.5721.hal-01454432v3

48. Besnard G, Hild F, Roux S. Finite-element displacement fields analysis from digital images: application to Portevin–Le Châtelier bands, *Exp Mech.,* 2006, Vol. 46(6), pp. 789-803.

49. Hild F., Roux S. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties—a review, *Strain*, 2006, Vol. 42(2), pp. 69-80.

50. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analysis, *Measure Sci. Technol*., 2010, Vol. 21, pp. 054014: 1–5.

Благодарности. Автор благодарит М.В. Надежкина за содействие в проведении записи цифровых изображений.
Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания для ИФФМ СО РАН, проект № FWRW-2021-0011.
Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Вклад автора 100 %.

Acknowledgments. The author thanks M.V. Nadezhkin for assistance in recording digital images.
Financing. The study was carried out within the Governmental Assignment for ISPMS SB RAS, Project No. FWRW-2021-0011.
Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.
The author's contribution 100 %