

Моделирование упруго-пластического деформирования приповерхностных слоев материалов

Мехеда В. А. 

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация; villiy.mekheda@gmail.com;

Поступила: 04.04.2024

Рассмотрена: 15.05.2024

Принята: 02.09.2024

Научная статья



Аннотация. По результатам тензометрических измерений для описания процесса упруго-пластического деформирования стали 1X18H9T используется модель кинематически упрочняющегося тела. Особое внимание уделено процессам, происходящим в приповерхностных слоях. Модель учитывает рост стесненности сдвиговых деформаций вглубь материала. Увеличение напряжения пластического течения в глубину описывается полиномом второго порядка. Экспериментально и путем расчетов методом редуцированных коэффициентов в процессе последовательных приближений определены основные параметры поверхностного эффекта: глубина, коэффициент упрочнения материала, напряжения пластического течения на поверхности и внутри материала. Показано, что для исследования приповерхностного эффекта тензометрическим методом следует отдавать предпочтение испытаниям образцов на изгиб, а не на растяжение. Наличием поверхностного эффекта объясняются следующие факты: разрушение образца при испытании на растяжение начинается не с поверхности, а изнутри, зарождение усталостных трещин происходит под поверхностью, приповерхностный эффект практически не влияет на деформированное состояние упругого тела, но очень сильно влияет на напряженное состояние у поверхности.

Ключевые слова: нелинейная деформация; приповерхностный эффект; напряжение пластического течения; упрочнение; трещина.

Введение

Определение и анализ напряженно-деформированного состояния в нагруженном элементе конструкции с учетом поверхностных дефектов представляет собой одну из ключевых проблем современной механики и ее практических приложений [1–3].

Особое поведение поверхностного и приповерхностных слоев материалов обусловлено тем, что свободная поверхность не препятствует развитию пластических сдвигов и в результате после статической и циклических нагрузок на поверхности наблюдаются выступы (экструзии) и впадины (интрузии) (рис. 1). Чем глубже слой, тем сильнее стеснение сдвиговых деформаций. Они тормозятся, в основном, границами зерен и разориентировкой плоскостей сдвига в блоках внутри зерен.

Местное возмущение в виде поверхностного эффекта, согласно принципу Сен-Венана, должно постепенно затухать, а напряжение пластического течения приповерхностных слоев, плавно возрастая, переходит на некоторой глубине в напряжение течения основного материала.

Слои материала, ослабленные поверхностным эффектом, при изгибе приводят к дополнительному повороту поперечного сечения образца по сравнению с упругим решением задачи.

Проявление поверхностного эффекта обнаруживается тензометрическим методом. Однако дополнительная нелинейная деформация на поверхности образца, фиксируемая тензорезистором, весьма мала по сравнению с упругой составляющей. Наиболее ярко это проявляется на уровнях номинальных напряжений, соответствующих области чистой усталости и ниже.

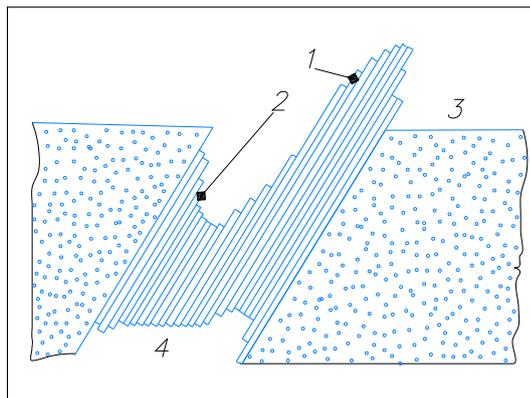


Рис. 1. Схема образования экструзий (1) и интрузий (2) на поверхности (3) металлических материалов, подвергнутых циклическим нагрузкам; (4) – полосы скольжения

Fig. 1. Scheme of the formation of extrusions (1) and intrusions (2) on the surface (3) of metal materials subjected to cyclic loads; (4) – slip stripes

1 Экспериментальное исследование приповерхностного эффекта

Используя свойства тензометрического измерительного моста, можно в его пределах из полной деформации поверхности ε вычесть линейную составляющую ε_L :

$$\varepsilon_{NL} = \varepsilon - \varepsilon_L = \varepsilon - \frac{\sigma}{E}. \quad (1)$$

При таком подходе достигается высокая точность измерения нелинейной деформации [4; 5]. Поскольку в металлах нелинейная упругая деформация практически отсутствует, то измеренная нелинейная деформация есть неупругая деформация.

Консольно закрепленный образец длиной 100 мм и постоянным поперечным сечением 4×14 мм из стали 1X18H9T в состоянии поставки подвергался поперечному изгибу силой, приложенной на свободном конце. Результаты такого эксперимента [6] приведены на рис. 2.

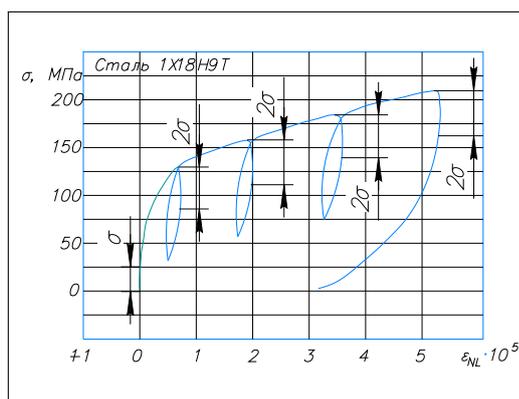


Рис. 2. Диаграмма деформирования стали 1X18H9T при поперечном изгибе с тремя промежуточными циклами разгрузки-нагрузки

Fig. 2. Strain-stress diagram of steel 1X18H9T during transverse bending with three intermediate unloading-loading cycles

Нагрузка прикладывалась достаточно медленно со скоростью изменения номинального напряжения 37,5 МПа/мин. Под номинальным напряжением понимается напряжение на поверхности образца, определенное по формуле сопротивления материалов при изгибе балок.

Тензометрическая аппаратура позволяет надежно фиксировать деформацию поверхности тела величиной $1 \cdot 10^{-6}$. Тогда, согласно диаграмме рис. 2, обнаруживаемое пластическое течение поверхности образца составляет $\sigma_{T1} = 25$ МПа.

Представляют интерес участки разгрузки. В начале этих участков, когда номинальное напряжение в образце стало снижаться, нелинейные деформации продолжали расти, и чем выше уровень достигнутого перед разгрузкой номинального напряжения, тем этот процесс протекает интенсивнее. Такое поведение материала можно объяснить проявлением процесса ползучести. Вклад ползучести в нелинейную деформацию достаточно весом, поэтому подобные эксперименты должны проводиться под управлением ЭВМ со строгим соблюдением режима нагружения во времени.

В металлах наблюдается единый процесс неупругого деформирования, отражением которого является нелинейная деформация, включающая пластическую составляющую и составляющую от ползучести.

Если отбросить проявление ползучести в начале участков разгрузки, то обратное пластическое течение при $\epsilon_{NL} = 1 \cdot 10^{-6}$ наблюдается при снижении номинального напряжения на 2σ (рис. 2). Поверхностный слой ведет себя как идеальное упруго-пластическое тело, а напряжение течения $\sigma = \sigma_{T1}$ — константа. Поверхностным слоем являются берега микро- и макротрещин, а также берега магистральной трещины. Снижение напряжений у поверхности микротрещин отмечается в работах [7; 8]. Замечено, что с увеличением напряжений в стали каждая микротрещина затуплялась, и вокруг нее возникало пластическое течение, а результирующие локальные концентрации напряжений были пренебрежимо малы.

Чтобы определиться с глубиной δ проявления поверхностного эффекта, была рассчитана производная от номинального напряжения по нелинейной составляющей деформации $\frac{d\sigma}{d\epsilon_{NL}}$. Производная является чувствительным индикатором происходящих структурных процессов. Как видно из рис. 3, производная в процессе нагружения сначала резко падает с увеличением нелинейной деформации, а затем в точке **В** характер ее изменения стабилизируется. Примем, что в точке **В** пластическое течение охватило все ослабленные приповерхностные слои. При этом номинальное напряжение достигло значения начала пластического течения внутренних слоев $\sigma_{T2} = 130$ МПа, а нелинейная деформация, фиксируемая тензорезистором на поверхности, достигла величины $\epsilon_{NL} = 7,64$ мкм/м.

Далее с увеличением изгибающего момента вклад поверхностного эффекта в нелинейную деформацию практически стабилизируется, а ее нарастание обусловлено включением в пластическое течение более глубоких внутренних слоев.

Закон изменения напряжения текучести в приповерхностных слоях в зависимости от глубины залегания слоя примем в виде полинома второй степени

$$\sigma_T(x) = Ax^2 + Bx + C, \quad (2)$$

где x — глубина расположения приповерхностного слоя, A, B, C — постоянные коэффициенты, определяемые из следующих граничных условий:

$$\sigma_T(0) = \sigma_{T1}, \quad \sigma_T(\delta) = \sigma_{T2}, \quad \frac{d\sigma_T}{dx}(\delta) = 0.$$

Здесь δ — глубина распространения приповерхностного эффекта.

Последнее условие обеспечивает плавный переход напряжения течения приповерхностных слоев в напряжения течения внутренних слоев.

Подстановка граничных условий в (2) дает

$$\sigma_T(x) = -\Delta\sigma_T \left(\frac{x}{\delta}\right)^2 + 2\Delta\sigma_T \frac{x}{\delta} + \sigma_{T1} \quad \text{при} \quad 0 \leq x \leq \delta. \quad (3)$$

Здесь введено обозначение

$$\Delta\sigma_T = \sigma_{T2} - \sigma_{T1}. \quad (4)$$

Глубина δ в выражении (3) подбиралась таким образом, чтобы при изгибающем моменте, вызывающем на поверхности образца напряжение σ_{T2} , расчетная нелинейная деформация ϵ_{NL2} под тензорезистором равнялась экспериментальному значению.

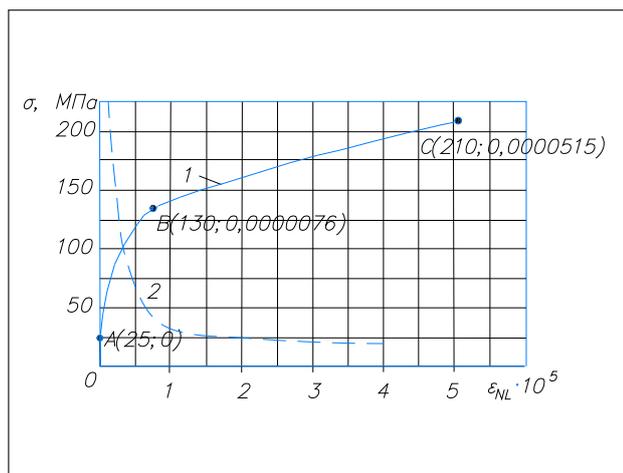


Рис. 3. Диаграмма деформирования (1) и первая производная (2) от номинального напряжения по нелинейной деформации

Fig. 3. Strain-stress diagram (1) and the first derivative (2) of the nominal stress with respect to nonlinear strain

Эта задача решена методом редуционных коэффициентов в процессе последовательных приближений. Образец разбивался по высоте на отдельные полоски толщиной Δx_i . Более мелкое разбиение (до 0,1 микрона) производилось в приповерхностных слоях, а ближе к оси изгиба образца $\Delta x_i = 0,4$ мм.

Последовательность вычислений в **нулевом** приближении

$$\varphi^{(0)} = 1 \rightarrow F^{(0)} = bh \rightarrow I^{(0)} = \frac{bh^3}{12} \rightarrow \sigma_i^{(0)} = \frac{M}{I^{(0)}} y_i \rightarrow \varepsilon_i^{(0)} = \frac{\sigma_i^{(0)}}{E}.$$

Здесь нижний индекс — номер полоски, верхний индекс в скобках — номер приближения, а y_i — расстояние от оси изгиба сечения до центра тяжести полоски.

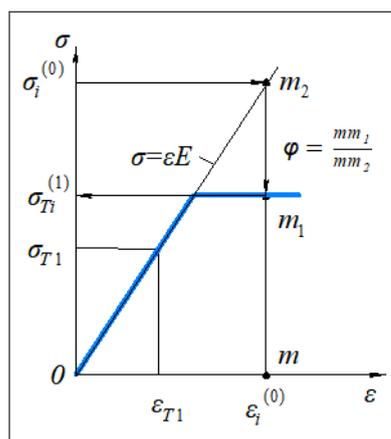


Рис. 4. Схема определения редуционных коэффициентов в первом приближении

Fig. 4. Scheme for determining reduction coefficients in a first approximation

В **первом** приближении (рис. 4) ослабление поперечного сечения образца пластическим деформированием учитывалось введением редуционного коэффициента φ_i , равного отношению напряжения пластического течения в i -й полоске, вычисленного по формуле (3), к номинальному напряжению в ней из предыдущего приближения

$$\varphi_i^{(1)} = \frac{\sigma_{Ti}^{(1)}}{\sigma_i^{(0)}}. \quad (5)$$

Расчет выполняется для уровня напряжения на поверхности 130 МПа в следующей последовательности:

$$\sigma_{Ti}^{(1)}(y_i, \varepsilon_i^{(0)}) = \begin{bmatrix} \varphi_i^{(1)} = 1 & \text{если } \sigma_{Ti}^{(1)} \geq \sigma_i^{(0)} \\ \varphi_i^{(1)} = \frac{\sigma_{Ti}^{(1)}}{\sigma_i^{(0)}} & \text{если } \sigma_{Ti}^{(1)} \leq \sigma_i^{(0)} \end{bmatrix} \rightarrow b_i^{(1)} = b\varphi_i^{(1)} \rightarrow F_i^{(1)} = b_i^{(1)} \Delta x_i \rightarrow$$

$$\rightarrow I_i^{(1)} = F_i^{(1)} y_i^2 \rightarrow I^{(1)} = 2 \sum_{i=1}^k I_i^{(1)} \rightarrow \sigma_i^{(1)} = \frac{M}{I^{(1)}} y_i \rightarrow \varepsilon_i^{(1)} = \frac{\sigma_i^{(1)}}{E}.$$

Пояснение. Материал приповерхностных полосок считается идеальным упруго-пластическим. Если напряжение нулевого приближения в полоске не превышает напряжение пластического течения в ней, то для полоски редуцированный коэффициент принимается равным единице. Для других приповерхностных полосок редуцированный коэффициент назначается в соответствии со схемой рис. 4.

Определяется эффективная ширина полоски, находится площадь полоски и переносный момент инерции относительно оси изгиба образца. Ввиду малости собственный момент инерции полосок не учитывается. Суммируются моменты инерции всех полосок, результат удваивается в силу симметрии сечения относительно оси изгиба. Вычисляются в первом приближении напряжения и деформации в сечении.

По такому же алгоритму выполняются и последующие приближения. Процесс последовательных приближений быстро сходится. Достаточно пяти приближений. Выполняя расчеты для разных δ , определено значение $\delta = 25,7$ мкм, удовлетворяющее условию равенства расчетного значения нелинейной деформации на поверхности образца экспериментальному значению (точка **В** на рис. 3).

Сдвиговые деформации неизбежно приводят к взаимному повороту кристаллических плоскостей в микро- и макрообъемах. Материал упрочняется и «запоминает» степень достигнутого упрочнения. Действительно, после каждой промежуточной разгрузки и последующего нагружения (см. рис. 2) состояние материала возвращается практически в исходную точку. Полного совпадения точек не происходит из-за ползучести материала, которая проявляется все сильнее с ростом уровня нагрузки. В предлагаемой модели ползучесть не учитывалась.

В соответствии с вышеизложенным принимаем, что сталь 1Х18Н9Т является кинематически упрочняющимся материалом, то есть предполагаем, что наряду с жестким смещением предельной поверхности текучести происходит также ее расширение [9].

Экспериментальная диаграмма деформирования на участке **ВС** (рис. 3) близка к линейной. Тогда, принимая линейный закон упрочнения, запишем

$$\begin{aligned} \sigma_i &= E\varepsilon_i, & \text{если } 0 \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{T2}, \\ \sigma_{Ti} &= E\varepsilon_{T2} + E^*(\varepsilon_i - \varepsilon_{T2}) = \sigma_{T2} + E^*(\varepsilon_i - \varepsilon_{T2}), & \text{если } \varepsilon_i \geq \varepsilon_{T2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь E^* — коэффициент упрочнения.

Проводя расчеты при различных значениях коэффициента упрочнения и используя описанный выше метод последовательных приближений и соблюдая условия точки **С** (рис. 3), получаем значение $E = 1,668 \cdot 10^5$ МПа, которое на 7,6 % ниже нормального модуля упругости $E = 2,0 \cdot 10^5$ МПа. Для учета упрочнения материала в приповерхностных слоях и устранения разрыва в напряжениях пластического течения при переходе от приповерхностных слоев к внутренним в начале каждого приближения вводится поправка: напряжение σ_{T2} в формуле (4) заменяется на $\sigma_{Ti}(\delta)$.

Таким образом, определены четыре параметра модели деформирования материала, которые характеризуют поверхностный эффект. Используя модель, были рассчитаны нелинейные деформации, если вместо испытаний на изгиб проводить испытания образца на растяжение. Результаты расчета приведены на рис. 5. Как видно из этого рисунка, нелинейная деформация на поверхности образца как минимум в три раза больше при изгибе, чем при растяжении в

области напряжений, при которых определяются параметры поверхностного эффекта. Следовательно, при изучении поверхностного эффекта методами тензометрии следует предпочитать испытания образцов на изгиб. Если предположить, что напряжения текучести в приповерхностном слое равны нулю, то такой предельный случай даст максимальное отклонение от линейной деформации 4 %. В действительности это значение будет еще меньше и не превысит 2 %.

Таким образом, поверхностный эффект очень слабо влияет на деформированное состояние упругого тела и значительно — на его напряженное состояние у поверхности. Поэтому он не обнаруживается экспериментальными методами, основанными на изучении деформированного состояния тела, такими как метод интерференционного муара или поляризационно-оптический, если в последнем изменение оптических свойств модели связывать с напряжениями, как у Максвелла, а не с деформациями по Нейману [10].

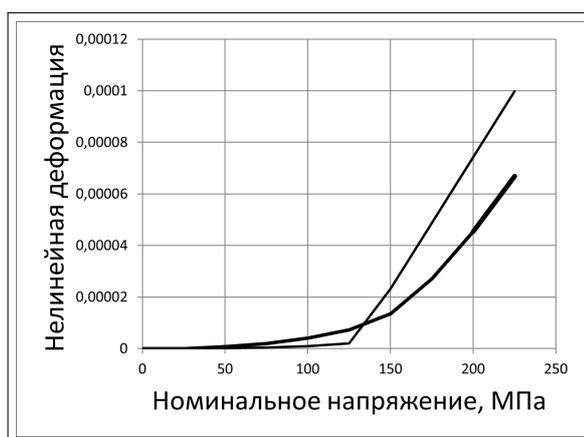


Рис. 5. Нелинейная деформация на поверхности образца в зависимости от номинального напряжения. Жирная линия — изгиб, тонкая линия — растяжение

Fig. 5. Nonlinear strain on the surface of the sample depending on the nominal stress. Thick line — bending, thin line — stretching

Изучение поверхностного эффекта осложняется тем, что, как правило, приповерхностные слои подвергаются различного рода обработкам с целью улучшения механических характеристик конструкций. В приповерхностных слоях протекают коррозионные процессы. Механическим удалением слоя невозможно избавиться от поверхностного эффекта.

Данное исследование проведено на коррозионно-устойчивом материале, что позволило свести к минимуму влияние коррозионных процессов, которые усложняют ситуацию.

Результаты расчета образца на изгиб и растяжение при одном и том же номинальном напряжении на поверхности 245 МПа приведены на рис. 6 и 7. Показано, как с глубиной изменяется удельная работа упругого, пластического деформирования и их суммы.

Особый интерес вызывает энергия пластического деформирования, которую можно считать мерой разрушения кристаллической структуры и превращения ее в аморфную. Согласно расчетам вне зависимости от вида нагружения энергия пластического деформирования достигает максимума под поверхностью на глубине от семи до восьми микрон. Следовательно, при воздействии переменной нагрузки зарождение микро- и макротрещин будет происходить под поверхностью, и трещина выйдет на поверхность после разрыва перемычки [11].

Однако при растяжении максимальная энергия пластического деформирования на 0,41 % выше, чем при изгибе. Следовательно, при растяжении-сжатии процесс накопления повреждений происходит интенсивнее, чем при изгибе, что подтверждается экспериментальными данными: предел выносливости при растяжении-сжатии ниже, чем при изгибе.

Как видно из рис. 7, полная энергия минимальна на поверхности образца. Значит начало разрушения образца при растяжении должно происходить изнутри, а излом иметь форму «конус-чашечка» [12].

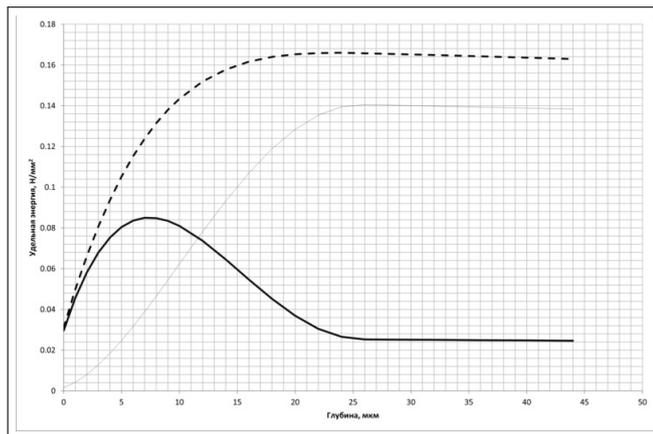


Рис. 6. Изменение энергий деформирования в приповерхностных слоях при изгибе образца: жирная линия — энергия пластического деформирования; тонкая линия — энергия упругого деформирования; пунктирная линия — полная энергия

Fig. 6. Changes in strain energies in the near-surface layers when the sample is bent: thick line — energy of plastic strain; thin line — energy of elastic strain; dotted line — the total energy

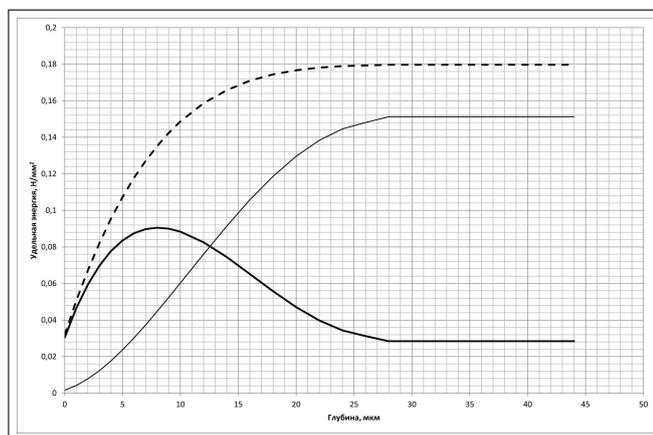


Рис. 7. Изменение энергий деформирования в приповерхностных слоях при растяжении образца: жирная линия — энергия пластического деформирования; тонкая линия — энергия упругого деформирования; пунктирная линия — полная энергия

Fig. 7. Changes in strain energies in the near-surface layers when the sample is stretched: thick line — plastic strain energy; thin line — elastic strain energy; dotted line — the total energy

Заключение

Предложенная модель деформирования металлов с учетом приповерхностного эффекта позволяет приближенно численным методом решать сложные упруго-пластические задачи и с единой позиции объяснять многие процессы, которые происходят при статическом и переменном нагружении.

Информация о конфликте интересов: автор и рецензенты заявляют об отсутствии конфликта интересов.

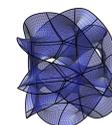
Цитирование. Мехеда В.А. Моделирование упруго-пластического деформирования приповерхностных слоев материалов // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия / Vestnik of Samara University. Natural Science Series. 2024. Т. 30, № 3. С. 25–34. DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-3-25-34.

© Мехеда В.А., 2024

Мехеда Виллий Андреевич (villiy.mekheda@gmail.com) – доцент кафедры космического машиностроения имени Генерального конструктора Д.И. Козлова, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Литература

- [1] Шанявский А.А., Солдатенков А.П. Связь границ масштабных уровней усталостной диаграммы и различие в механизмах разрушения на мезо- и макромасштабном уровне // Физическая мезомеханика. 2024. Т. 27, № 1. С. 49–63. DOI: http://doi.org/10.55652/1683-805X_2024_27_1_49-63. EDN: <https://elibrary.ru/hzvqox>.
- [2] Инженерное материаловедение / В.В. Перинский [и др.]. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023. 363 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50472977>. EDN: <https://elibrary.ru/atqcmw>.
- [3] Основы металловедения и технологии производства труб из коррозионно-стойких сталей / Д.А. Пумпянский [и др.]. Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Металлург-издат", 2023. 682 с.
- [4] Мехеда В.А., Хазанов Х.С. О методах измерения динамической петли гистерезиса // Вопросы прикладной механики в авиационной технике: сб. тр. Куйбышев, 1972. С. 47–52. URL: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Voprosy-prikladnoi-mehaniki-v-aviacionnoi-tehnike/O-metodah-izmereniya-dinamicheskoi-petli-gisterezisa-94664/1.pdf>.
- [5] Мехеда В.А. О связи неупругих деформаций с усталостной прочностью металлов при изгибе // Вопросы прикладной механики в авиационной технике: сб. ст. аспирантов кафедр "Сопротивление материалов", "Прочность летательных аппаратов", "Аэрогидродинамика". Куйбышев, 1972. С. 53–59. URL: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Voprosy-prikladnoi-mehaniki-v-aviacionnoi-tehnike/O-svyazi-neuprugih-deformacii-s-ustalostnoi-prochnostu-metallov-pri-izgibe-94663>.
- [6] Мехеда В.А., Спивак С.Е. Установка для измерения неупругих деформаций: сб. тр. студентов и аспирантов факультета летательных аппаратов. Студенческая наука аэрокосмическому комплексу. Самара: Изд.-во СГАУ, 2006. Вып. 8. С. 92–99.
- [7] Авербах Б.Л. Некоторые физические аспекты разрушения // Разрушение / ред. Г. Либовиц, пер. с англ. Т. 1. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. Москва: Мир, 1973. С. 471–504. URL: https://books.totalarch.com/fracture_vol_1?ysclid=m0qc0vukjv734101484.
- [8] Бичем К.Д. Микропроцессы разрушения // Разрушение / ред. Г. Либовиц, пер. с англ. Т. 1. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. Москва: Мир, 1973. С. 265–375. URL: https://books.totalarch.com/fracture_vol_1?ysclid=m0qcacwyvm856194334.
- [9] Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела: учебник для втузов. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 418 с.
- [10] Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. Москва: Наука, 1973. 576 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35626697>. EDN: <https://www.elibrary.ru/xzsbpsp>.
- [11] Шанявский А.А. Самоорганизация кинетики усталостных трещин // Синергетика и усталостное разрушение металлов. Москва: Наука, 1989. С. 57–76. URL: <https://tut-files.ru/previewfile/77143/10>.



- [12] Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации: учеб. пособие для вузов. Москва: Металлургия, 1982. 584 с. URL: <https://djuv.online/file/3Yc0Ahq4OX0Fy?ysclid=m0qd786upz326089843>.

DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-3-25-34

Modeling of elastic plastic deformation of near-surface layers of materials

Mekheda V.A. 

Samara National Research University, Samara, Russian Federation; villiy.mekheda@gmail.com;

Received: 04.04.2024

Revised: 15.05.2024

Accepted: 02.09.2024

Scientific article



Abstract. According to the results of strain measurements, a kinematically hardening body model is used to describe the process of elastic-plastic deformation of 1X18H9T steel. Special attention is paid to the processes occurring in the surface layers. The model takes into account the increasing tightness of shear deformations deep into the material. The increase in the stress of the plastic flow in depth is described by a second-order polynomial. The main parameters of the surface effect were determined experimentally and by calculations using the method of reduction coefficients in the process of successive approximations: depth, coefficient of hardening of the material, stresses of plastic flow on the surface and inside the material. It is shown that in order to study the near-surface effect by the strain gauge method, it is necessary to give preference to bending tests of samples rather than stretching. The presence of the surface effect explains the following facts: the destruction of the sample during the tensile test does not begin from the surface, but from the inside, the origin of fatigue cracks occurs under the surface, the surface effect practically does not affect the deformed state of the elastic body, but very strongly affects the stress state at the surface.

Key words: nonlinear deformation; near-surface effect; stress of plastic flow hardening crack.

Information about the conflict of interests: the author and reviewers declare no conflict of interest.

Citation. Mekheda V.A. Modeling of elastic plastic deformation of near-surface layers of materials. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya / Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2024, vol. 30, no. 3, pp. 25–34. DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-3-25-34. (In Russ.)

© Mekheda V.A., 2024

Villiy A. Mekheda (villiy.mekheda@gmail.com) – associate professor of the Department of Space Engineering, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, 443086, Russian Federation.

References

- [1] Shanyavskiy A.A., Soldatenkov A.P. Relationship between stresses for the boundaries of scale levels of fatigue diagram and the difference of the meso- and macroscale. *Physical Mesomechanics*, 2024, vol. 27, no. 1, pp. 49–63. DOI: http://doi.org/10.55652/1683-805X_2024_27_1_49-63. EDN: <https://elibrary.ru/hzvqox>. (In Russ.)
- [2] Perinskii V.V., Perinskaia I.V., Kalganova S.G., Venig S.B. Engineering materials science. Moscow: Ai Pi Ar Media, 2023, 363 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50472977>. EDN: <https://elibrary.ru/atqcmw>. (In Russ.)

- [3] Pumpyanskii D.A., Pyshmintsev I.Yu., Vydrin A.V. [et al.] Fundamentals of metal science and technology of production of pipes from corrosion-resistant steels. Moscow: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Metallurgizdat", 2023, 682 p. (In Russ.)
- [4] Mekheda V.A., Khazanov Kh.S. On methods for measuring the dynamic hysteresis loop. In: *Issues of applied mechanics in aviation technology: collection of articles*. Kuibyshev, 1972, pp. 47–52. Available at: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Voprosy-prikladnoi-mehaniki-v-aviacionnoi-tehnike/O-metodah-izmereniya-dinamicheskoi-petli-gistereza-94664>. (In Russ.)
- [5] Mekheda V.A. On the connection between inelastic deformations and the fatigue strength of metals during bending. In: *Issues of applied mechanics in aviation engineering: collection of articles by postgraduate students of the Department "Strength of materials", "Strength of aircrafts", "Aerohydrodynamics"*. Kuibyshev, 1972, pp. 53–59. Available at: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Voprosy-prikladnoi-mehaniki-v-aviacionnoi-tehnike/O-svyazi-neuprugih-deformacii-s-ustalostnoi-prochnostu-metallov-pri-izgibe-94663>. (In Russ.)
- [6] Mekheda V.A., Spivak S.E. Installation for measuring nonlinear deformations. In: *Collection of works of students and graduate students of the Faculty of Aircrafts. Student science to the aerospace complex*. Samara: Izd-vo SGAU, 2006, issue 8, pp. 92–99. (In Russ.)
- [7] Averbakh B.L. Some physical aspects of destruction. In: *Liebowitz H. (Ed.) Fracture. An advanced treatise. Vol. 1. Microscopic and macroscopic fundamental: translation from English*. Moscow: Mir, 1973, pp. 471–504. Available at: https://books.totalarch.com/fracture_vol_1?ysclid=m0qc0vukjv734101484. (In Russ.)
- [8] Beecham K.D. Microprocesses of destruction. In: *Liebowitz H. (Ed.) Fracture. An advanced treatise. Vol. 1. Microscopic and macroscopic fundamental: translation from English*. Moscow: Mir, 1973, pp. 265–375. Available at: https://books.totalarch.com/fracture_vol_1?ysclid=m0qcacwyvm856194334. (In Russ.)
- [9] Selivanov V.V. Mechanics of fracture of a deformable body: textbook for colleges. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 1999, 418 p. (In Russ.)
- [10] Alexandrov A.Ya., Akhmetzyanov M.Kh. Polarization-optical methods of mechanics of a deformable body. Moscow: Nauka, 1973, 576 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35626697>. EDN: <https://www.elibrary.ru/xzsbps>. (In Russ.)
- [11] Shanyavsky A.A. Self-organization of fatigue crack kinetics. In: *Synergetics and fatigue fracture of metals*. Moscow: Nauka, 1989, pp. 57–76. Available at: <https://tut-files.ru/previewfile/77143/10>. (In Russ.)
- [12] Polukhin P.I., Gorelik S.S., Vorontsov V.K. Physical foundations of plastic deformation: textbook for universities. Moscow: Metallurgiya, 1982, 584 p. Available at: <https://djvu.online/file/3Yc0Ahq4OX0Fy?ysclid=m0qd786upz326089843>. (In Russ.)