

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ КОВКИ

Научная статья

Галкин В.В.^{1,*}, Вашурин А.В.², Пачурин Г.В.³, Дербенев А.А.⁴

^{1, 2, 3, 4} Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (lumi1950[at]mail.ru)

Аннотация

Разработана методика оценки изменения структурного состояния и формирования механических свойств металлических материалов в технологических процессахковки. Методика основана на положениях концепции поэтапного анализа изменения структуры и формирования механических свойств деформированных металлических сплавов с учетом накопленной степени деформации. Структура методики, применительно к технологическим процессамковки, была дополнена положением о структурно-механических исследованиях материала на переходах деформирования в зависимости от показателей деформированного состояния и межоперационных подогревов. Апробация разработанной методики представлена оценкой изменения структуры и формировании механических свойств аустенитной стали 12X18H10T в процессековки ступенчатой заготовки.

Ключевые слова: металлические материалы, деформационный анализ, математическое моделирование процессовковки, структурно-механические свойства.

METHODOLOGY FOR ASSESSING CHANGES IN THE STRUCTURAL STATE AND MECHANICAL PROPERTIES OF METALLIC MATERIALS IN FORGING TECHNOLOGY PROCESSES

Research article

Galkin V.V.^{1,*}, Vashurin A.V.², Pachurin G.V.³, Derbenev A.A.⁴

^{1, 2, 3, 4} Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

* Corresponding author (lumi1950[at]mail.ru)

Abstract

A methodology for assessing changes in the structural state and formation of mechanical properties of metallic materials in forging technology processes has been developed. The technique is based on the provisions of the concept of stage-by-stage analysis of structure change and formation of mechanical properties of deformed metal alloys, taking into account the accumulated degree of deformation. The structure of the methodology, as applied to technological processes of forging, was supplemented by the provision on structural and mechanical studies of the material at the deformation transitions depending on the indicators of the deformed state and inter-operational heating. Approbation of the developed methodology is represented by the evaluation of changes in the structure and formation of mechanical properties of austenitic steel 12X18H10T in the process of forging a stepped billet.

Keywords: metallic materials, deformation analysis, mathematical modelling of forging processes, structural and mechanical properties.

Введение

Ковка, как один из видов обработки давлением, имеет значительное применение в машиностроении для изготовления изделий из металлических материалов (в дальнейшем по тексту – материалов) в условиях горячей обработки. Одной из основных задач процессовковки, кроме получения формы и размеров поковок, является получение требуемых механических свойств материала в их объеме.

Структурные изменения деформированных материалов при ковке, и связанные с ними формирование механических свойств, определяются условиями пластического деформирования, к которым относятся величина накопленной степени деформации, величина единичных обжатий, температурный интервал, число и длительность подогревов материала между переходамиковки.

В значительной степени горячей обработки подвергаются нержавеющие и жаропрочные сплавы, используемые при изготовлении ответственных объемных деталей, работающих в условиях высоких температур и коррозионной среды. Изделия изготавливаются многопереходными процессами свободной, как правило, с использованием основных операций осадки и протяжки, и промежуточных подогревов. Процессы пластического деформирования материалов характеризуются большими степенями деформации, а также пространственной неоднородностью деформированного и структурного состояния материала.

В действующей практике кузнечного производства используются положения, основанные на многолетнем технологическом опыте:

– итоговая степень деформации кузнечной обработки задается показателем уковки, который для каждого материала и ответственности, изготавливаемого из него изделия, имеет определенное значение,

– ковка основных групп поковок выполняется отработанными технологическими процессами, имеющими определенную последовательность операций и технологические параметры их выполнения: относительную подачу, степень обжатия и т.д.

В то же время получение однородности механических свойств является одной из основных характеристик кованых изделий. Поэтому решение вопросов, связанных с анализом неравномерности деформированного, и как следствие структурного состояния материала в процессековки является весьма актуальным.

В связи с этим целью данной работы являлась разработка методики оценки изменения структурно-механических свойств материалов в процессахковки.

Для ее достижения были поставлены задача поэтапного анализа изменения структуры и формирования механических свойств деформированных материалов с учетом накопленной степени деформации.

Методы и принципы исследования

Начиная с первых работ, выполненных Ф. Киком, Э. Холленбергом, Н. Метцем [1, С. 5]. в начале прошлого столетия, неравномерность деформации в объеме формоизменяющих заготовок исследовалась многими учеными. Из отечественных ученых в областиковки следует отметить труды Я.М. Охрименко и В.А. Тюрина [2, С. 151], И.Я. Тарновского, В.Н. Трубина и М.Г. Златкина [3, С. 25] и других ученых. В работах представлены разработанные технологические процессы изготовления основных групп поковок, дана оценка неравномерности деформации материала формоизменяющих операций, приведены применяемые технологические показатели их деформированного состояния. В экспериментальных исследованиях, в качестве основного метода, использовалось моделирование, основанное на деформации составных свинцовых образцов, припаяваемых сплавом Вуда, и имеющих в плоскостях разреза координатную сетку [4, С. 53], по результатам замеров строились поля деформации. При всей своей показательности и возможности расчета деформированного состояния метод координатных сеток явился недостаточным для определения накопленной деформации при вариантахковки, имеющих сочетание двух и более разнородных операций. В настоящее время в качестве оценки деформированного состояния используют характеристику В.В. Илюшина, которая определяет степень деформации любой материальной частицы тела, как арифметическую сумму интенсивностей последовательных малых деформаций, в результате которых осуществляется данное ее конечное (значительное) формоизменение [5, С. 137]. Для условия многоэтапного пластического деформирования расчет степени деформации был уточнен Г.А. Смирновым-Аляевым [5, С. 137], согласно которому степень деформации за весь технологический процесс определяется как арифметическая сумма интенсивностей деформации отдельных операций.

В отношении исследования неоднородности структурного состояния материала и их влияния на формирование механических свойств в технологических процессахковки следует отметить их немногочисленность и ограниченность. Практически все структурные исследования горячедеформированных материалов проводилось с использованием стандартизованных испытаний на растяжение, сжатие и кручение. При этом следует отметить, что структурные изменения горячедеформированных металлических материалов на микроструктурном уровне связаны с процессом рекристаллизации [6, С. 137]. Основными зависимостями, оценивающих процесс рекристаллизации горячедеформированных материалов, являются трехмерные диаграммы рекристаллизации, построенные в координатах «средняя величина (площадь) зерна – фактическая степень деформации – температура» [7, С. 143]. Однако данные диаграммы рекристаллизации не позволяют в полной мере дать оценку процесса рекристаллизации в многопереходном процессе горячего деформирования с большими степенями деформации, в частности процессахковки, по двум причинам. Во-первых, в диаграммах в качестве показателя фактической степени деформации используется относительная степень осаженного образца по высоте, которая не характеризует степень деформации материала в условиях сложного нагружения. Во-вторых, показатель относительной степени деформации в диаграммах имеет малые значения и не превышает 80%.

Для процессов свободнойковки, по причине отсутствия зависимостей рекристаллизации материала для условий больших степеней деформации, многопереходности процесса и наличия подогревов материала между переходами, актуальной задачей является разработка методики их оценки, что и стало целью работы.

В силу выявленной несостоятельности исследований горячедеформированных материалов в условиях многопереходного деформирования с использованием стандартизованных монотонных испытаний, в данной работе предложена методика, основанная на положениях концепции поэтапного анализа изменения структуры и формирования механических свойств деформированных металлических сплавов с учетом накопленной степени деформации [8, С. 9].

Структура методики, применительно к оценке структурно-механических свойств металлических материалов в технологических процессахковки, включила этапы:

- деформирование материалов в технологических испытаниях, моделирующих процессковки конкретной группы поковок, и определение степени деформации на переходах и последовательно накопленной после каждого перехода;
- исследование поэтапного изменения структурного состояния и формирования механических свойств материала на переходах деформирования в зависимости от показателей деформированного состояния и межоперационных подогревов.

Апробация разработанной методики была проведена на примере исследования деформированной стали аустенитного класса 12X18H10T [9, С. 78] в технологическом испытании, моделирующем процессковки ступенчатойковки. Исследование поэтапного изменения структурного состояния и формирования механических свойств проводилось на переходах деформирования, разработанных в соответствии с технологическими рекомендациями процессаковки ступенчатых поковок [3, С. 177].

Ступенчатую заготовку ковали на пневматическом молоте из горячекатаного проката диаметром 60 мм и длиной 300 мм за четыре перехода (см. рис. 1).



Рисунок 1 - Фотография четырехступенчатой кованой заготовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.1>

Каждую ступень заготовки формировали последовательными обжатиями в интервале температур (950÷1150) °С с двух сторон с промежуточной кантовкой на 90° и подогревами между переходами при температуре 1150 °С. В соответствии с рекомендациями ВИАМ время первого подогрева составило 15 мин, второго – 10 мин, третьего – 7 мин. Переходы ковки ступеней заготовки и их поперечные размеры приведены на рис. 2.

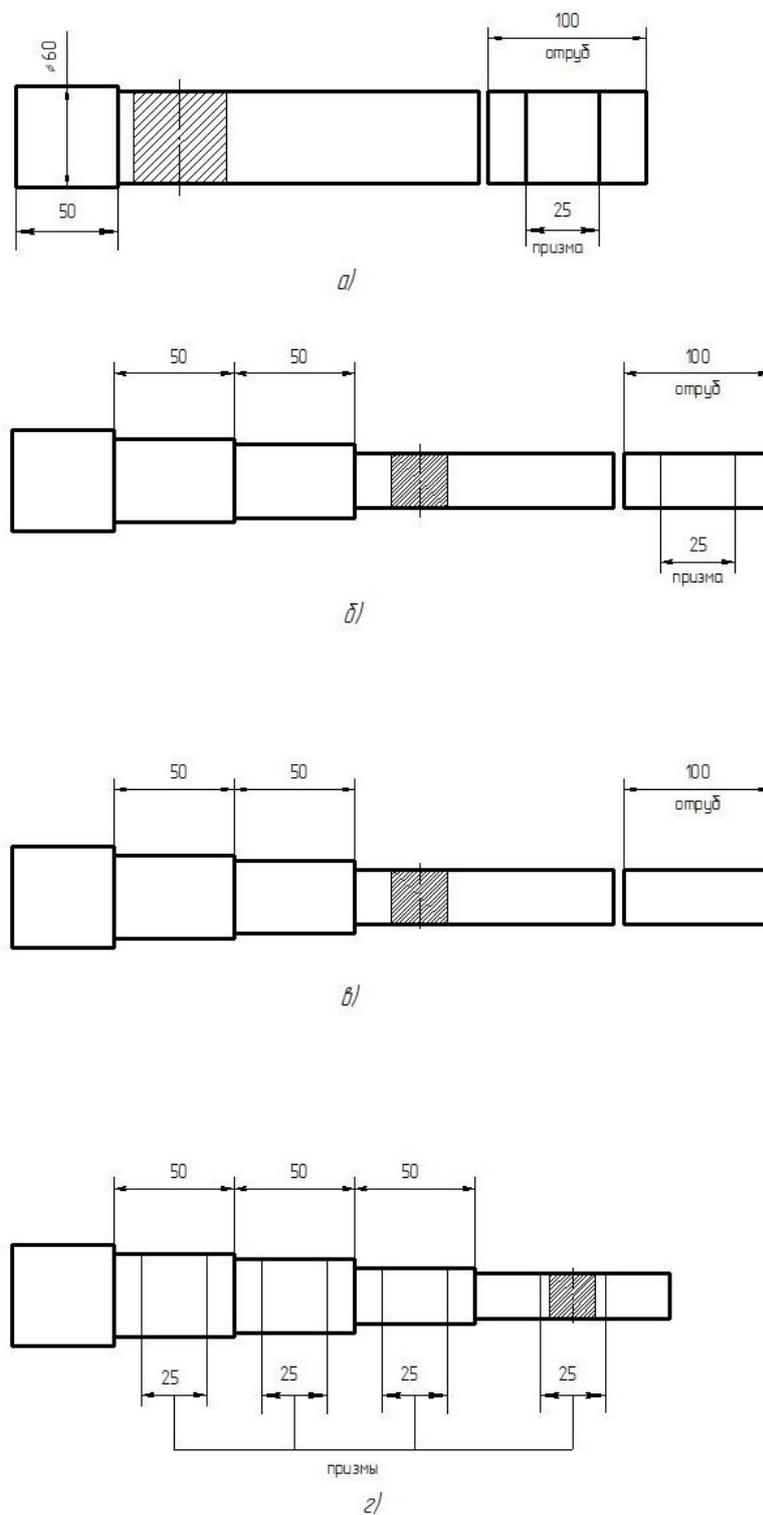


Рисунок 2 - Переходы деформирования ступенчатой заготовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.2>

Примечание: а – 1-й переход (сечение 43×50 мм, = 1,31); б – 2-й переход (36×36 мм, = 1,66, $y_{2общ}$ = 2,08); в – 3-й переход (32×34 мм, = 1,19, $y_{3общ}$ = 2,59); г – 4-й переход (22×24 мм, = 1,12, $y_{4общ}$ = 5,3)

Технологические показатели деформации материала ступеней заготовки, были определены с использованием показателя укова, рассчитанного как отношение площади поперечных сечений заготовки до и после протяжки. Рассчитанные показатели укова по переходам деформирования и суммарный уков приведены в подрисуночной надписи рис. 2.

Методика работы включила деформационный анализ и структурно-механические исследования материала каждой ступени заготовки.

Деформированное состояние материала в объеме ступеней заготовки в показателе интенсивности деформации определяли методом численного моделирования физических процессов согласно ГОСТ Р 57188-2016 [10, С. 3] с использованием программного комплекса DEFORM, разработанного на основе метода конечных элементов (см. рис. 3).

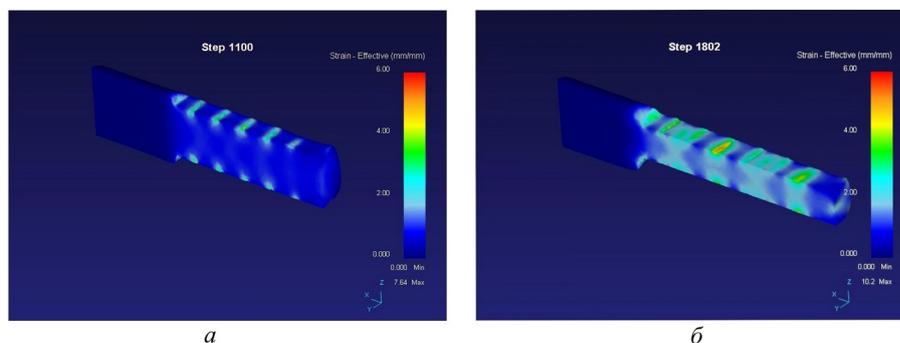


Рисунок 3 - Картины деформированного состояния стали 12Х18Н10Т 1-й ступени заготовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.3>

Примечание: а – после первого прохода и кантовки; б – после второго прохода

Структурно-механические исследования проводили на образцах, вырезанных из средних зон (призмы длиной 25 мм) отрубленных частей каждого перехода деформирования (см. рис. 2, а, б, в) и ступеней заготовки (см. рис. 2, г).

Металлографический анализ микроструктур выполняли на микроскопе KEYENCE VHX-1000 на продольных шлифах образцов по направлениям 1, 2 и 3 (см. рис. 4). Для обработки цифровых фотографий микроструктур использовали разработанную для ЭВМ программу [11].

Твердость измеряли на поперечных шлифах образцов с шагом 2 мм по направлениям 4 и 5 (см. рис. 4).

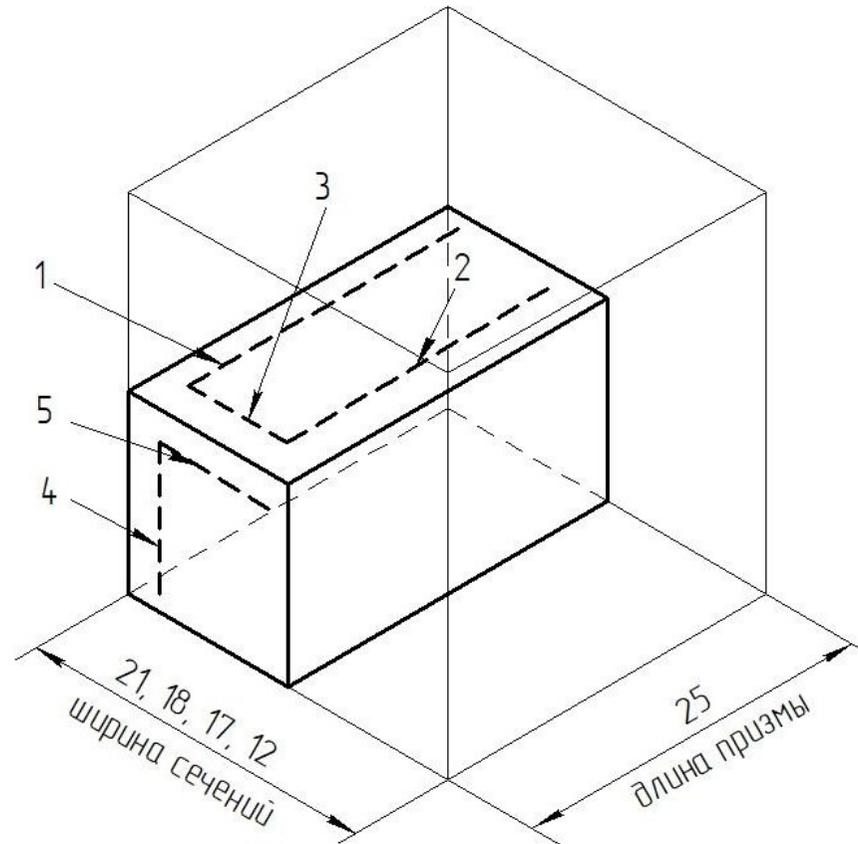


Рисунок 4 - Направления структурно-механических исследований на продольном (1, 2 и 3) и поперечном (4 и 5) шлифах образцов, вырезанных из призм
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.4>

Основные результаты

Результаты деформационного анализа материала первых трех ступеней ковальной заготовки, обозначенные на ее поперечных сечениях линиями одинаковой интенсивности деформации (см. рис. 5), свидетельствуют об изменении неравномерности деформации материала ступеней заготовки в зависимости от накопленной степени деформации.

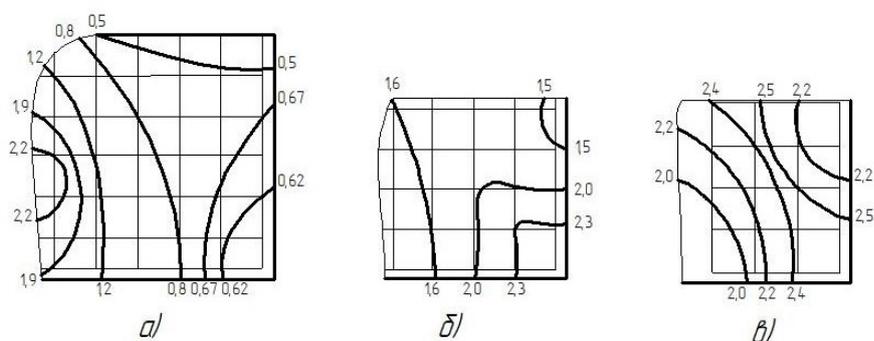


Рисунок 5 - Линии одинаковой интенсивности деформации (цифры) в поперечных сечениях первой (а), второй (б) и третьей (в) ступеней заготовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.5>

Микроструктура исходного материала – горячекатаного проката (см. рис. 6), состоит из однородных аустенитных зерен (средняя площадь $a \approx 375 \text{ мкм}^2$, средний диаметр $\approx 20 \text{ мкм}$), размеры которых не изменились при нагреве без деформирования в течение 1 час.

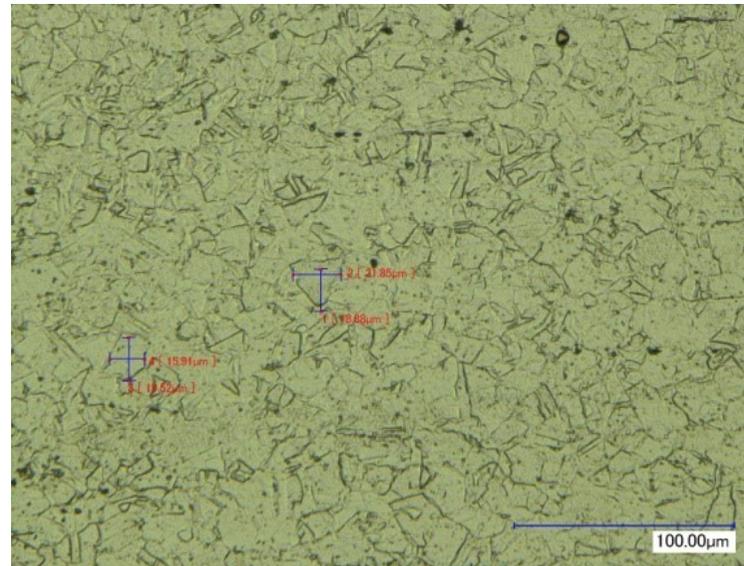


Рисунок 6 - Микроструктура аустенитной стали 12X18H10T в исходной поставке горячекатаного проката
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.6>

Структурные изменения материала первой ступени заготовки после первого перехода деформирования характеризуются неравномерностью (см. рис.7).

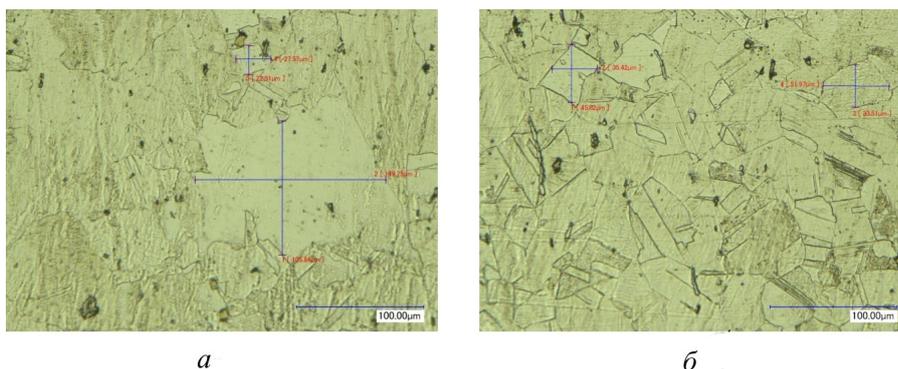


Рисунок 7 - Микроструктуры стали 12X18H10T первой ступени после деформирования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.7>

Примечание: а – периферийная зона; б – центральная зона

В периферийной зоне (см рис.7 а) при интенсивности деформации менее 0,5, отдельные зерна достигают размера = 120 мкм ($a \approx 14400 \text{ мкм}^2$). В центральной зоне (см. рис. 7 б) при интенсивности деформации более 0,7, микроструктура представляют собой неоднородные зерна с двойниками в виде многогранников с прямыми границами, средний размер которых = 42 мкм ($a \approx 1750 \text{ мкм}^2$). Полученные результаты значительного роста зерна в периферийной зоне согласуются с данными, изложенными в патенте «Способ построения зависимостей рекристаллизации» [12], в котором приведена зависимость рекристаллизации стали X18H10T с интервалом критических степеней деформации в показателе интенсивности деформации $0,12 \div 0,22$.

В микроструктуре материала второй ступени заготовки после деформирования в периферийной зоне (см. рис. 8 а) наблюдается увеличение числа больших зерен. В центральной зоне (см. рис. 8 б) микроструктура, по сравнению с первой ступеней, характеризуется дроблением зерна.

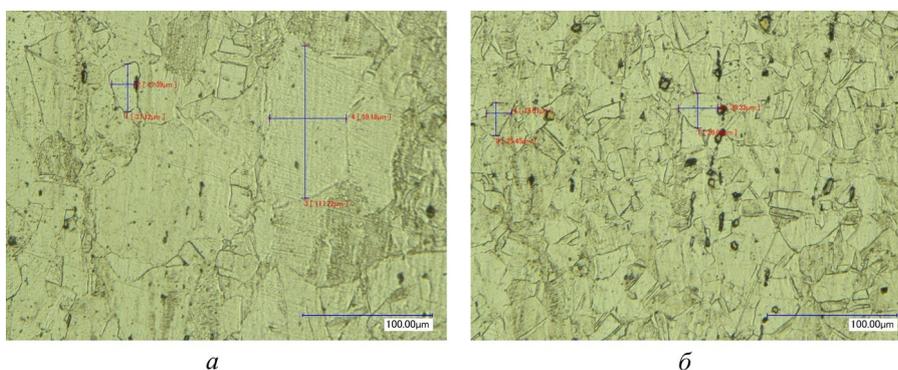


Рисунок 8 - Микроструктуры стали 12X18H10T второй ступени после деформирования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.8>

Примечание: а – периферийная зона; б – центральная зона

Микроструктура материала третьей ступени заготовки после деформирования (см. рис. 9) в периферийной зоне содержит равноосные неоднородные зерна с максимальным размером 27 мкм ($a \approx 800 \text{ мкм}^2$). В центральной зоне присутствуют неоднородные зерна с двойниками в виде многогранников с прямыми границами, средний размер 34 мкм ($a \approx 1200 \text{ мкм}^2$).

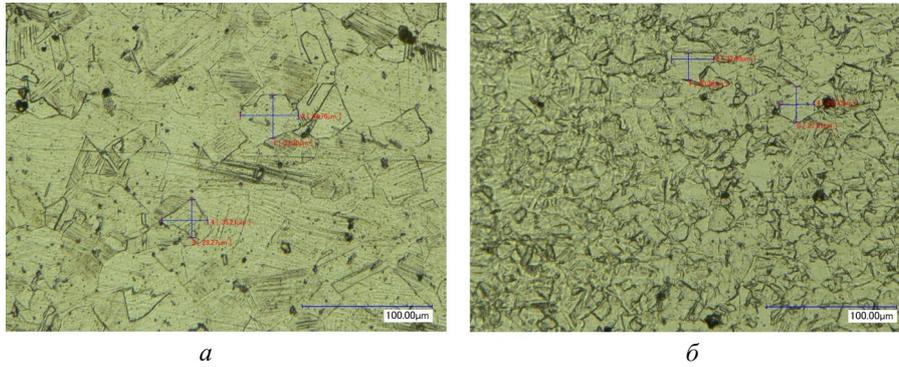


Рисунок 9 - Микроструктуры стали 12Х18Н10Т третьей ступени после деформирования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.9>

Примечание: а – периферийная зона; б – центральная зона

При деформировании четвертой ступени заготовки по всему сечению сформировалась одинаковая микроструктура с равноосными однородными зернами ≈ 20 мкм, средняя площадь которых $a \approx 375$ мкм² (см. рис. 10), что соответствует размеру исходного недеформированного зерна горячекатаного проката.

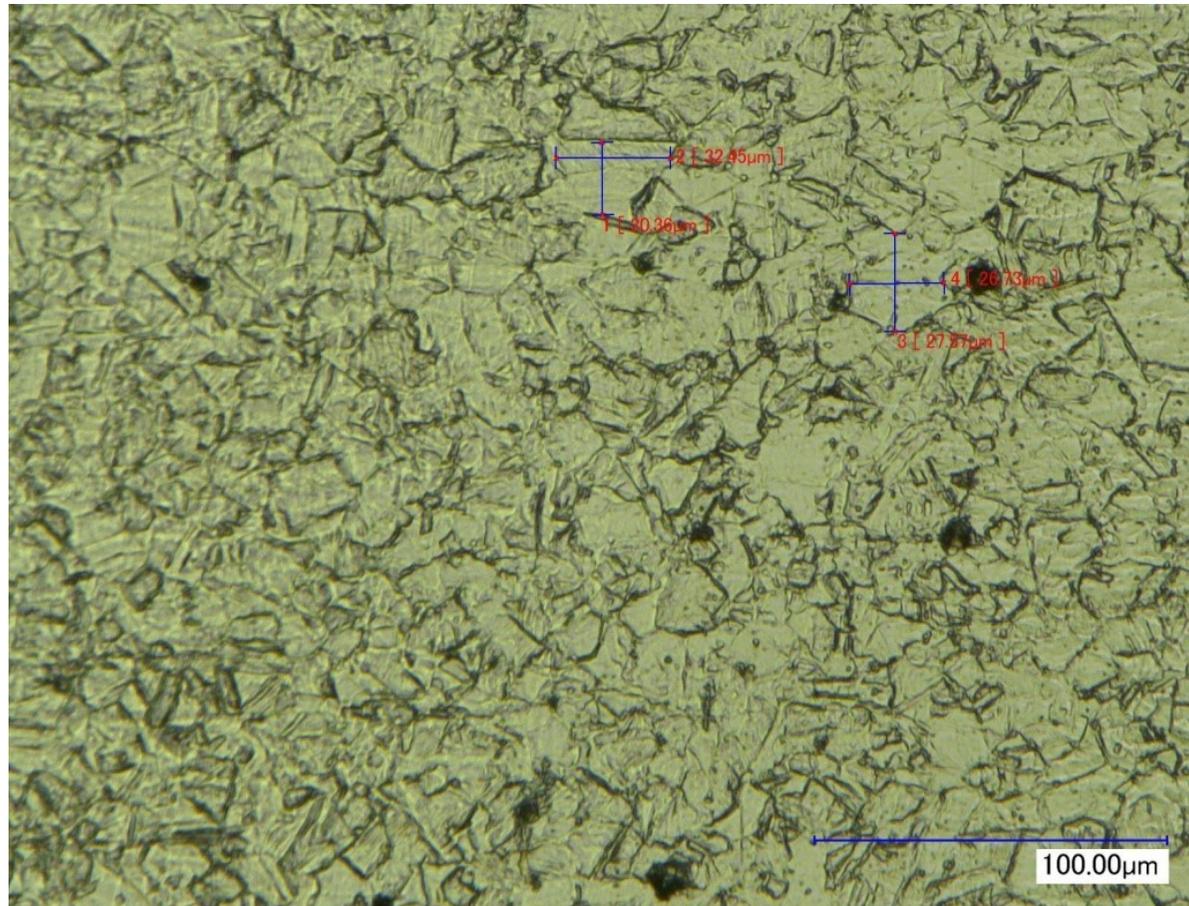


Рисунок 10 - Микроструктура стали 12X18H10T четвертой ступени
после деформирования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.10>

Обсуждение

Полученные результаты позволили сделать следующий вывод о влиянии накопленной степени деформации на структурные изменения в материале при горячей дробной деформации. Для достижения равномерной мелкозернистой структуры по сечению ступенчатой заготовки ее ковку следует проводить с выполнением определенного технологического показателя: суммарный уков при изготовлении ступенчатой заготовки с применением операции протяжка из аустенитной стали 12X18H10T должен иметь значение не менее 5,3.

Структурные изменения материала ступеней ковальной заготовки кроме накопленной степени деформации определяются числом и длительностью подогревов. Наибольшие изменения произошли в материале периферийной зоны первой и второй ступени заготовки.

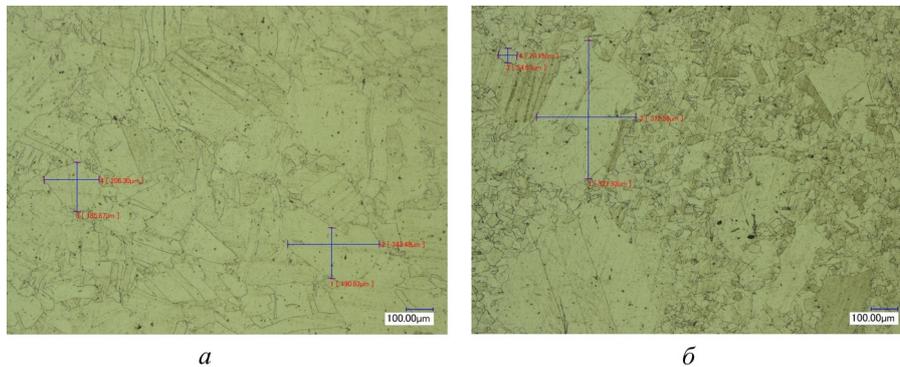


Рисунок 11 - Микроструктуры стали 12X18H10T периферийной зоны заготовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.11>

Примечание: а – первой ступени; б – второй ступени

В первой ступени (см. рис. 11, а) за три последующих подогрева без деформации наблюдается рост зерна до размера = 340 мкм ($a \approx 120000 \text{ мкм}^2$), который ~ в 3 раза больше зерна при деформировании 120 мкм ($a \approx 14400 \text{ мкм}^2$). Во второй ступени (см. рис. 11, б) после двух подогревов произошло укрупнение зерна в 5 раз по сравнению с исходным зерном до = 105 мкм ($a \approx 11000 \text{ мкм}^2$).

В микроструктуре материала третьей ступени заготовки после одного подогрева (см. рис. 12) значительного роста зерна не наблюдалось.

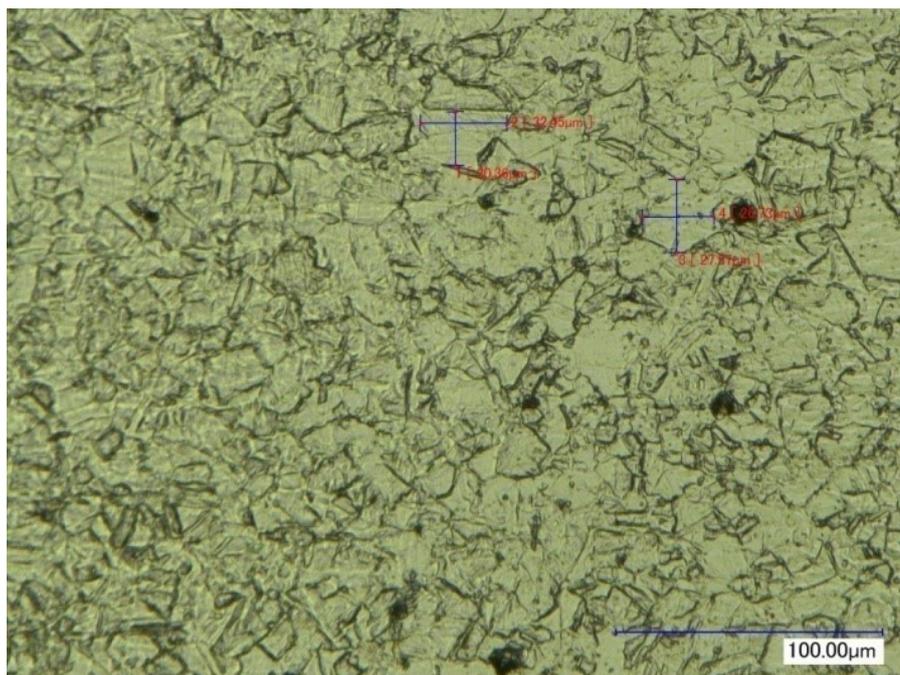


Рисунок 12 - Микроструктуры стали 12X18H10T третьей ступени после одного подогрева
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.12>

По всему сечению сформировалась одинаковая микроструктура с размером зерна = 28 мкм ($a \approx 600 \text{ мкм}^2$), который в 3 раза меньше зерна на второй ступени, однако в отдельных зонах наблюдались зерна размером = 36 мкм ($a \approx 1200 \text{ мкм}^2$).

При деформировании четвертой ступени заготовки по всему сечению сформировалась микроструктура (см. рис.10) с равноосными однородными зёрнами $\approx 20 \text{ мкм}$, средняя площадь которых $a \approx 375 \text{ мкм}^2$, что соответствует размеру исходного недеформированного зерна горячекатаного проката.

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии последующих нагревов на ступени ковальной заготовки в зависимости от накопленной степени деформации, при этом получение равномерной мелкозернистой структуры по сечению ступенчатой заготовки достигается при выполнении технологического показателя-суммарного укова величиной не менее 5,3.

Оценка упрочнения материала проводилась измерениями его твердости на ступенях заготовки. Твердость первых двух ступеней заготовки в периферийной зоне уменьшалась с 61 до 49 HRA, по центру – с 63 до 48 HRA. На третьей ступени, обжатой до укова $u_{3\text{обж}} = 2,59$, твердость материала повысилась и по всему сечению достигла значения 54 HRA, а на четвертой, при укове $u_{4\text{обж}} = 5,3$ достигла твердости $61 \div 63 \text{ HRA}$ недеформированного материала. Полученные результаты показали незначительное влияние размера зерна на повышение прочности, подтверждающее положение, что основной вклад в деформационное упрочнение вносит повышение плотности дислокаций, а не уменьшение размера зерна при пластической деформации.

Заключение

Полученные впервые экспериментальные данные влияния накопленной степени деформации на структурные изменения в материале при горячей дробной деформации стали аустенитного класса 12X18H10T, подтвердили состоятельность разработанной методики оценки изменения структурного состояния и формирования механических свойств металлических материалов в технологических процессахковки.

Разработанная методика основана на положениях концепции поэтапного анализа изменения структуры и формирования механических свойств деформированных металлических сплавов с учетом накопленной степени деформации, как основного влияющего фактора.

Структура методики, применительно к технологическим процессамковки, дополнена положением о структурно-механических исследованиях материала на переходах деформирования в зависимости от показателей деформированного состояния и межоперационных подогревов.

Для процессовковки основных групп поковок разработанная методика позволяет разработать технологические приложения, содержащие данные деформационного анализа и структурно-механических свойств деформируемого материала.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.13>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.114.13>

Список литературы / References

1. Пресняков А.А. Очаг деформации / А.А. Пресняков. — Алма-Ата : Металлургия, 1989. — 176 с.
2. Охрименко Я.М. Теория процессовковки / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин. — Москва : Высшая школа, 1977. — 295 с.
3. Тарновский И.Я. Свободная ковка на прессах / И.Я. Тарновский, В.Ф. Трубин, М.Г. Златкин. — Москва : Машгиз, 1967. — 328 с.
4. Охрименко Я.М. Неравномерность деформации при ковке / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин. — Москва : Машиностроение, 1969. — 184 с.
5. Смирнов-Аляев Г.А. Сопrotивление металлов пластическому деформированию / Г.А. Смирнов-Аляев. — Ленинград : Машиностроение, 1978. — 368 с.
6. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С.С. Горелик, С.В. Добаткин, Л.М. Капуткина. — Москва : МИСИС, 2005. — 432 с. — EDN QMZQSH.
7. Аверкиев А.Ю. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / А.Ю. Аверкиев, Д.И. Бережковский, Ю.С. Вильчинский [и др.]; под ред. Е.И. Семенова // Ковка и штамповка : справочник : в 4-х т. — Москва : Машиностроение, 1985. — Т. 1. — 384 с.
8. Галкин В.В. Научно-технологическая концепция формирования механических свойств деформированных металлических сплавов в условиях сложного нагружения на основе поэтапного структурно-деформационного анализа : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.01 / В.В. Галкин. — Нижний Новгород, 2023. — 336 с.
9. Галкин В.В. Рекристаллизация аустенитной стали X18H10T при дробной горячей деформации / В.В. Галкин, А.Д. Рябцев, Г.Н. Гаврилов [и др.] // Вестник машиностроения. — 2021. — № 11. — С. 78–83. — EDN LELLEK.
10. ГОСТ Р 57188-2016. Численное моделирование физических процессов. — Введ. 2016-10-24. — Москва : Стандартинформ. — 2016.

11. Манцеров С.А. Определение величины зерна для оценки рекристаллизации горячедеформированных сталей и сплавов : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611190 / С.А. Манцеров, В.В. Галкин, Р.Г. Хадеев [и др.]; правообладатель Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. — № 2014662663; заявл. 2014-12-09; зарег. 2015-01-26.

12. Галкин В.В. Способ построения зависимостей рекристаллизации : пат. 2817327 РФ, МПК G01N 3/18, C21D 11/00 / В.В. Галкин, Г.Н. Гаврилов, А.В. Вашурин [и др.]; заявитель и патентообладатель В.В. Галкин. — № 2023116399; заявл. 2023-06-22; опубл. 2024-04-15.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Presnyakov A.A. Ochag deformatsii [Deformation Focus] / A.A. Presnyakov. — Alma-Ata : Metallurgiya, 1989. — 176 p. [in Russian]

2. Okhrimenko Ya.M. Teoriya protsessov kovki [Theory of Forging Processes] / Ya.M. Okhrimenko, V.A. Tyurin. — Moscow : Higher School, 1977. — 295 p. [in Russian]

3. Tarnovskiy I.Ya. Svobodnaya kovka na pressakh [Free Forging on Presses] / I.Ya. Tarnovskiy, V.F. Trubin, M.G. Zlatkin. — Moscow : Mashgiz, 1967. — 328 p. [in Russian]

4. Okhrimenko Ya.M. Neravnomernost deformatsii pri kovke [Non-Uniformity of Deformation During Forging] / Ya.M. Okhrimenko, V.A. Tyurin. — Moscow : Mashinostroenie, 1969. — 184 p. [in Russian]

5. Smirnov-Alyayev G.A. Soprotivlenie metallov plasticheskomu deformirovaniyu [Resistance of Metals to Plastic Deformation] / G.A. Smirnov-Alyayev. — Leningrad : Mashinostroenie, 1978. — 368 p. [in Russian]

6. Gorelik S.S. Rekrizatsiya metallov i splyavov [Recrystallization of Metals and Alloys] / S.S. Gorelik, S.V. Dobatkin, L.M. Kaputkina. — Moscow : MISIS, 2005. — 432 p. — EDN QMZQSH. [in Russian]

7. Averkiev A.Y. Materialy i nagrev. Oborudovanie. Kovka [Materials and Heating. Equipment. Forging] / A.Y. Averkiev, D.I. Berezhkovsky, Y.S. Vilchinsky [et al.]; edited by E.I. Semenov // Kovka i shtampovka : spravochnik : v 4-h t. [Forging and Stamping : handbook : in 4 volumes]. — Moscow : Mashinostroenie, 1985. — Vol. 1. — 384 p. [in Russian]

8. Galkin V.V. Nauchno-tekhnologicheskaya kontseptsiya formirovaniya mekhanicheskikh svoystv deformirovannykh metallicheskikh splyavov v usloviyakh slozhnogo nagruzheniya na osnove poetapnogo strukturno-deformatsionnogo analiza [Scientific and Technological Concept of Forming Mechanical Properties of Deformed Metal Alloys Under Complex Loading Based on Step-by-Step Structural and Deformation Analysis] : dis. ... of Grand PhD in Engineering : 05.16.01 / V.V. Galkin. — Nizhny Novgorod, 2023. — 336 p. [in Russian]

9. Galkin V.V. Rekrizatsiya austenitnoy stali Kh18N10T pri drobnoy goryachey deformatsii [Recrystallization of "X18H10T" austenitic steel under fractional hot deformation] / V.V. Galkin, A.D. Ryabtsev, G.N. Gavrilov [et al.] // Vestnik mashinostroeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]. — 2021. — № 11. — P. 78–83. — EDN LELLEK. [in Russian]

10. GOST R 57188-2016. Chislennoe modelirovanie modelirovaniem s primeneniem programnykh produktov, razrabotannykh na osnove metoda konechnykh elementov [Numerical Simulation Using Software Products Based on the Finite Element Method]. — Introd. 2016-10-24. — Moscow : Standartinform. — 2016.

11. Mantserov S.A. Opredelenie velichiny zerna dlja ocenki rekrizatsii gorjachedeformirovannykh stalej i splyavov [Determination of Grain Size for Assessing Recrystallization of Hot-Deformed Steels and Alloys] : Certificate of State Registration of Computer Program № 2015611190 / S.A. Mantserov, V.V. Galkin, R.G. Khadeev [et al.]; copyright holder Nizhny Novgorod State Technical University. — № 2014662663; appl. 2014-12-09 ; reg. 2015-01-26.

12. Galkin V.V. Sposob postroeniya zavisimostey rekrizatsii [Method for Constructing Recrystallization Dependencies] : pat. 2817327 Russian Federation, МПК G01N 3/18, C21D 11/00 / V.V. Galkin, G.N. Gavrilov, A.V. Vashurin [et al.]; the applicant and the patentee V.V. Galkin. — № 2023116399; appl. 2023-06-22; publ. 2024-04-15. [in Russian]