

## ФИЗИКА

УДК 62, 620.17

ГРНТИ 53.49.13

<https://doi.org/10.47526/2022-3/2524-0080.05>

**А.Р.ТАШМЕТОВ<sup>1</sup>, Н.А.ШЕКТИБАЕВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Магистрант Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясави,  
(Казахстан, Туркестан), E-mail: [akmal.tashmetov@ayu.edu.kz](mailto:akmal.tashmetov@ayu.edu.kz)

<sup>2</sup>PhD, старший преподаватель

Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави  
(Казахстан, Туркестан), E-mail: [nurdaulet.shektibaev@ayu.edu.kz](mailto:nurdaulet.shektibaev@ayu.edu.kz)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ FE-MN И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММЕ COMSOL MULTYPHISICS

**Аннотация.** На сегодняшний день одной из важнейших проблем промышленного производства является снижение шума и вибрации. Для решения данной проблемы, сплавы подвергаются различным обработкам, для повышения демпфирующих свойств.

В этой статье речь идет о влиянии термообработки на демпфирующие свойства сплавов на основе Fe-Mn. Одной из основных преимуществ термической обработки является – повышение износостойкости материалов и сплавов. Термической обработке подвергают заготовки в том случае, если необходимо получить другие физико-химические свойства материалов.

В исследованиях по теме использовался метод конечных элементов. Метод конечных элементов основан на приближении непрерывной функции. Получается метод заключается в том, что разбивает участок на множество элементов, рассчитывая каждый из элементов, тем самым повышая точность расчета.

В результате исследований был получен сплав на основе Fe-Mn с более повышенными демпфирующими свойствами. Было проведено сравнение стандартной стали с образцом. А также была предоставлена имитационная модель на программе Comsol Multiphysics. Было определено напряженно-деформированное состояние образцов.

Результаты научных исследований могут быть использованы в области машиностроения.

**Ключевые слова:** Термическая обработка, сплав Fe-Mn, демпфирующие свойства, имитационная модель, эффект памяти формы, диссипативные свойства, тензор напряжений.

**А.Р. Ташметов<sup>1</sup>, Н.А. Шектибаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің  
магистранты,

(Қазақстан, Түркістан), E-mail: [akmal.tashmetov@ayu.edu.kz](mailto:akmal.tashmetov@ayu.edu.kz)

<sup>2</sup>PhD, аға оқытушы

Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті  
(Қазақстан, Түркістан), E-mail: [nurdaulet.shektibaev@ayu.edu.kz](mailto:nurdaulet.shektibaev@ayu.edu.kz)

### FE-MN негізіндегі қорытпалардың демпферлік қасиеттеріне термоөндеудің әсерін зерттеу және comsol multiphysics бағдарламасындағы имитациялық моделдеу

**Аңдатпа.** Бүгінгі таңда өнеркәсіптік өндірістің маңызды мәселелерінің бірі Шу мен дірілді азайту болып табылады. Бұл мәселені шешу үшін қорытпалар демпферлік қасиеттерін

арттыру үшін әртүрлі өңдеуден өтеді.

Бұл мақалада термиялық өңдеудің Fe-Mn негізіндегі қорытпалардың демпферлік қасиеттеріне әсері туралы айтылады. Термиялық өңдеудің негізгі артықшылықтарының бірі-материалдар мен қорытпалардың тозуға төзімділігін арттыру. Егер материалдардың басқа физика-химиялық қасиеттерін алу қажет болса, дайындамалар термиялық өңдеуден өтеді.

Тақырып бойынша зерттеулерде соңғы элементтер әдісі қолданылды. Ақырлы элементтер әдісі үздіксіз функцияны анықтауға негізделген. Бұл әдіс аймақты көптеген элементтерге бөліп, элементтердің әрқайсысын есептеп, есептеу дәлдігін арттырады.

Зерттеулер нәтижесінде Fe-Mn негізінде жоғары демпферлік қасиеттері бар қорытпа алынды. Стандартты болатты үлгімен салыстыру жүргізілді. Сондай-ақ, COMSOL Multiphysics бағдарламасында Имитациялық модель ұсынылды. Үлгілердің кернеулі күйі болды.

Ғылыми зерттеулердің нәтижелерін машина жасау саласында қолдануға болады.

**Кілт сөздер:** термиялық өңдеу, Fe-Mn қорытпасы, демпферлік қасиеттері, модельдеу моделі, жад пішінінің әсері, диссипативті қасиеттері, кернеу тензоры.

**A.R. Tashmetov<sup>1</sup>, N.A. Shektibaev<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Master's student of Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University*

*E-mail: [akmal.tashmetov@ayu.edu.kz](mailto:akmal.tashmetov@ayu.edu.kz)*

*<sup>2</sup>PhD, senior lecturer, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University*

*E-mail: [nurdaulet.shektibaev@ayu.edu.kz](mailto:nurdaulet.shektibaev@ayu.edu.kz)*

### **Investigation of the effect of heat treatment on the damping properties of Fe-Mn-based alloys and simulation in the COMSOL Multiphysics program**

**Abstract.** To date, one of the most important problems of industrial production is the reduction of noise and vibration. To solve this problem, alloys are subjected to various treatments to increase damping properties.

This article deals with the effect of heat treatment on the damping properties of Fe-Mn-based alloys. One of the main advantages of heat treatment is an increase in the wear resistance of materials and alloys. The workpieces are subjected to heat treatment if it is necessary to obtain other physical and chemical properties of the materials.

The finite element method was used in the research on the topic. The finite element method is based on the application of a continuous function. It turns out that the method consists in dividing the plot into many elements, calculating each of the elements, thereby increasing the accuracy of the calculation.

As a result of the research, an alloy based on Fe-Mn with higher damping properties was obtained. A comparison of standard steel with a sample was carried out. And also a simulation model was provided on the Comsol Multiphysics program. There was definitely a stress-strain state of the samples.

The results of scientific research can be used in the field of mechanical engineering.

**Keywords:** Heat treatment, Fe-Mn alloy, damping properties, simulation model, shape memory effect, dissipative properties, stress tensor.

### **Введение**

Одной из актуальных проблем на сегодняшний день является снижение шума и вибрации в промышленном производстве. Исследователи со всего мира, подвергают сплавы различным обработкам, для повышения физико-химических свойств, а также для повышения демпфирующих свойств. Это и является одной из главных причин, почему я выбрал данную тему.

Как утверждал Александров Виктор Михайлович, в своей учебной пособии - “Термическая обработка – это процесс, при котором необходимый металл нагревают и выдерживают при определенной температуре, с последующим его охлаждением. В ходе этого процесса металл претерпевает изменения механических свойств.” [1]. Получается, при высокой температуре изменяется микроструктура металла, которая играет огромную роль в механических свойствах. Итоговый результат зависит от множества различных факторов.

Имитационное моделирование в программе “Comsol Multyphysics”. Современное программное обеспечение дает возможность имитационно моделировать физические процессы, которые позволяют более точно анализировать демпфирующие свойства сплавов, т.к. вычислительная возможность данных программных пакетов обширна. Одной из таких программ является COMSOL Multyphysics. Эта программа содержит в себе обширную часть пакетов. Данная программа при расчетах использует метод конечных элементов. Почему многие ведущие компании выбирают данную программу? Одной из главных причин является точность расчетов, а также широкий спектр возможностей. Данная программа рассчитывает все научные и инженерные задачи, которые основываются на использовании дифференциальных уравнениях в частных производных. С данным программным обеспечением можно расширить стандартные модели, для расчета связанных между собой физических явлений. Благодаря встроенным физическим режимам, коэффициенты задаются в виде понятных физических свойств и условий [2].

Программа COMSOL Multiphysics проводит расчеты, связанные с дифференциальным уравнением в частных производных методом численного приближения к самой функции. Так как компьютер не умеет работать с уравнениями. Такое приближение называется метод конечных элементов. Его название говорит о идее решения. Программой по требованию пользователя объем тела делится на части некоторого размера. По итогу получается тело, состоящее из большого количества элементов. Образующаяся сетка представляет собой форму тела. Каждая подобласть решается в своих границах и узлах. Каждый элемент имея соседей и общие границы позволяют решить поочередно для любого из них показатели. Используются различные аппроксимации. Каждая из них используется в своем конкретном случае. Применяются они для расчета различных инженерных явлений. Затрагивают многие области такие как звуковые процессы, реакции между веществами, диффузное разбавление веществ, взаимодействие между частицами магнитными полями, движение лучей света. Для каждой из них программа применит свои формулы. То есть она может решить задачи в зависимости от рассматриваемого явления [3].

Есть несколько схожих тем. Например в 2021 году, была выпущена статья на тему “Влияние термической обработки на мартенситное превращение и специфические свойства сплавов с памятью формы Fe-Mn-Si-Cr, обработанных методом интенсивной пластической деформации НШПТ”. В данной статье иностранные ученые исследовали способность некоторых сплавов запоминать свою форму при двух разных температурах называется эффектом памяти формы (SME), а соответствующие материалы называются сплавами с памятью формы (SMAs). Способность некоторых сплавов запоминать свою форму при двух разных температурах называется эффектом памяти формы, а соответствующие материалы называются сплавами с памятью формы. Эффект памяти форм определяется недиффузионным фазовым превращением первого порядка, называемым мартенситным превращением. При мартенситном превращении атомы перемещаются на расстояния, меньшие межатомных расстояний, и переходят из аустенитной фазы с высокой температурой и высокой симметрией (кубический тип) в мартенситную фазу с низкой температурой, с более низкой симметрией (тетрагональной, орторомбической, гексагональной). Сплавы NiTi, сплавы на основе Cu и Fe являются наиболее известными типами SMA. На основании их кристаллической структуры в аустенитной фазе они группируются в « $\beta$ -тип» с объемно-центрированной кубической ячеистой структурой, их подклассом являются Ni-Ti, Co-Ni-Ga,

Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni и Ni-Mn-Ga, сплавы Гейслера Ni-Fe-Ga и « $\gamma$ -тип», с гранцентрированной кубической ячеистой структура, содержащая Fe-Mn и Fe-Mn-Si, FePd или FeNiCoTi. Среди них сплавы Fe-Mn с памятью формы обладают хорошей обрабатываемостью. Влияние термической обработки на месте на мартенситное превращение и удельные свойства сплавов Fe-Mn-Si-Cr с памятью формы, обработанных методом интенсивной пластической деформации. Мартенситное превращение сплавов Fe-Mn-Si показывает особое упругое мартенситное  $\gamma$ - $\varepsilon$  превращение, индуцированное напряжением, и его обратное  $\varepsilon$ - $\gamma$  превращение при последующем нагреве. Кроме того, помимо  $\varepsilon$ -мартенсита (гексагональная плотноупакованная - структура, вызванная напряжением),  $\alpha'$ -мартенсит (объемно-центрированной тетрагональная - структура) может появиться на пересечениях кристаллографических дефектов, вызванных пластической деформацией, такой как механические двойники, дефекты упаковки и полосы сдвига. Кроме того, согласно,  $\alpha'$ -мартенсит может образовываться в  $\varepsilon$ -мартенсите напряжения, в вероятном  $\gamma$ - $\varepsilon$ - $\alpha'$ -превращении, причем  $\varepsilon$ -мартенсит выступает промежуточной фазой для  $\alpha'$ -формирования. В последние годы большой интерес вызывает проектирование свойств материалов и следовательно, взаимосвязь между параметрами процесса и свойствами материалов требует большего понимания. Например, до конца не известно, какие физические процессы, происходящие при интенсивной пластической деформации твердых материалов, приводят к существенным изменениям типичных свойств сырья. Таким образом, были разработаны многочисленные методы для уточнения микроструктуры. Возможность управления размером зерен с помощью интенсивной пластической деформации открывает возможность управления  $\gamma$ - $\varepsilon$  мартенситным превращением в ферросплавах с памятью формы. Исследования показывают, что сверх-мелкозернистые сплавы с памятью форм на основе железа демонстрируют превосходную восстанавливаемую деформацию, что является более полезным в долгосрочных инженерных приложениях [4].

На протяжении многих лет бинарная система сплавов Fe-Mn была предметом обширных экспериментальных и теоретических исследований в рамках особого интереса к высокой демпфирующей способности, пластичности и упрочняющей способности этих сплавов, их магнитных свойств и возможности получения эффекта памяти формы в некоторых композициях. Упомянутые свойства сильно зависят от содержания Mn, и в свою очередь, составляющие фазы, которые могут быть одной или комбинацией гранцентрированной кубической аустенита ( $\gamma$ ), гексагональная плотно-упакованная  $\varepsilon$ -мартенсита ( $\varepsilon$ ) и объемно-центрированная кубическая мартенсит ( $\alpha'$ ). В связи с этим в некоторых исследованиях изучались микроструктура и свойства сплавов по составу для Fe - (11–17%) Mn, Fe - (17–23%) Mn и Fe - (16–36 %) Mn. Фундаментальные исследования для глубокого понимания фазы первого порядка и обратной фазы преобразований в этой системе ( $\gamma \rightleftharpoons \alpha'$ ,  $\gamma \rightleftharpoons \varepsilon$ ,  $\varepsilon \rightleftharpoons \alpha'$ ) было важно не только для настройки свойств бинарных сплавов Fe-Mn, но и для разработки сталей с высоким содержанием Mn, где Mn заменяет дорогие аустенитные стабилизирующие элементы, такие как Ni и Cr. Хотя большинство опубликованных работ связанные с литыми или деформируемыми сплавами, провели всестороннее исследование, направленное по порошковой металлургии бинарных сплавов Fe-Mn (4-40 Mn), которые можно сгруппировать по фазам превращения, микроструктуры и механических свойств, характера и особенностей разрушения, структурообразование при деформации и рекристаллизации, механизм энергии, диссипативные и демпфирующие свойства. За последние три десятилетия в области порошковой металлургии были проведены огромные исследования для включать Mn (0,5-4%) в качестве дешевого, но эффективного легирующего элемента при производстве спеченных конструкционных материалов частей (0,2-1,5% C), чтобы заменить дорогостоящие элементы, такие как никель и молибден, и добиться устойчивого и экономичное изготовление при промышленных условиях спекания. Добавление Mn было опробовано в различных формы, включающие смешанные,

ферромарганцевые, лигатурные и предсплавные порошки. Пока есть плюсы и минусы каждого метода, вопросы, на которые следует обратить внимание, обычно связаны со сжимаемостью порошка, возгонка и окисление Mn при спекании, диффузия и распределение Mn в Fe развитие матрицы и микроструктуры. Эти факторы во многом определяют успех производство и утилизация высококачественных марганецсодержащих сталей порошковой металлургии. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных свойствам и возможностям соединения Fe–30% Mn и аналогичные сплавы с высоким содержанием марганца для применения в биоразлагаемых имплантатах. В то время как несколько исследований касаются обработки порошковой металлургии сплава Fe-30% Mn и аналогичных составов, ни в одном из этих исследований не изучалась критическая характеристика сырьевых порошков таких как размер частиц порошка и его влияние на конечные свойства спеченных сплавов [5].

Вышеперечисленные результаты исследований, показывают широкий спектр возможностей по улучшению демпфирующих свойств сплавов.

Целью данной работы является, исследование влияния термообработки на демпфирующие свойства сплавов на основе Fe-Mn. А также определение напряженно-деформированного состояния образцов.

К задачам исследования относятся:

- исследование демпфирующих, физико-механических свойств сплавов на основе Fe-Mn;
- имитационное моделирование образцов в программе “Comsol Multiphysics”;
- Определение напряжения и статической деформации для образцов.

### **Методы исследования**

Предметом исследования являются сплавы на основе Fe-Mn.

Описание законов физики для задач, зависящих от пространства и времени, обычно выражается в терминах дифференциальных уравнений в частных производных (УЧП). Для подавляющего большинства геометрий и задач, эти в уравнении частных производных не могут быть решены аналитическими методами. Вместо этого может быть построена аппроксимация уравнений, обычно основанная на различных типах дискретизации. Эти методы дискретизации аппроксимируют уравнением частных производных, уравнениями численной модели, которые можно решить с помощью численных методов. Решение уравнений численной модели, в свою очередь, является аппроксимацией реального решения уравнения частного производного. Для вычисления таких приближений используется метод конечных элементов.

Глобальная система уравнений имеет известные методы решения и может быть рассчитана по начальным значениям исходной задачи для получения числового ответа.

На первом шаге выше уравнения элементов представляют собой простые уравнения, которые локально аппроксимируют исходные сложные уравнения, подлежащие изучению, где исходные уравнения часто являются уравнениями в частных производных. Для объяснения аппроксимации в этом процессе метод конечных элементов обычно вводят как частный случай метода Галеркина. Процесс на математическом языке, заключается в построении интеграла внутреннего произведения невязки и весовых функций и установке интеграла равным нулю. Проще говоря, это процедура, которая минимизирует ошибку аппроксимации путем подгонки пробных функций к уравнению частных производных. Остаток - это ошибка вызванная пробными функциями, а весовые функции - это функции полиномиальной аппроксимации, которые проецируют остаток. Процесс устраняет все пространственные производные от уравнения частных производных, тем самым локально аппроксимируя уравнения частных производных с помощью набора алгебраических уравнений для стационарных задач, набор обыкновенных дифференциальных уравнений для

нестационарных задач. Эти наборы уравнений являются уравнениями элементов. Они линейны, если базовое уравнение частных производных линейно, и наоборот. Системы алгебраических уравнений, возникающие в стационарных задачах, решаются с использованием методов численной линейной алгебры, а системы обыкновенных дифференциальных уравнений, возникающие в задачах переходных процессов, решаются путем численного интегрирования с использованием стандартных методов, таких как метод Эйлера или метод Рунге - Кутты.

На втором шаге глобальная система уравнений генерируется из уравнений элементов путем преобразования координат локальных узлов поддоменов в глобальные узлы домена. Это пространственное преобразование включает в себя соответствующие корректировки ориентации, применяемые по отношению к базовой системе координат. Этот процесс часто выполняется программным обеспечением с использованием данных координат, сгенерированных из субдоменов.

В данной статье используется метод конечных элементов. Данный метод является численным методом решения задач прикладной физики. Метод широко используется в различных областях, начиная с гидродинамики и заканчивая электродинамикой. Метод конечных элементов используется в ряде инженерных программ. Причина, по которой многие используют данный метод, является точность измерений.

В ходе исследования была использована программа COMSOL Multiphysics. В качестве образца была использована пластина.

### **Результаты, анализ и обсуждение**

Исследуемый материал, из которого состоит пластина - сталь. Представляет собой соединение железа и углерода в различных соотношениях, формах частиц. При получении данный сплав имеет различные свойства в зависимости от содержания углерода и его формы. В ходе процесса изготовления примеси имеют место. Виды примесей могут быть постоянными или неизбежными [6].

При более высоком содержании Mn, он образует с Fe твердый раствор, увеличивающий твердость, прочность стали и не очень уменьшая пластичность. Поэтому, марганец делает сталь более твердой и устойчивой к износу (при высоком содержании) [7].

В связи с повышенными требованиями, возложенными на данный материал. Желательно выбрать из данной системы один из доступных вариантов. Так как на данный момент именно эта группа сплавов получила большее распространение. Материалы, получаемые в результате сплавления железа и марганца, имеют высокие требуемые характеристики относительно их веса. То есть отношение прочности к единице веса, а также пластичности к единице веса имеют показатели больше, чем подобные ему материалы в этой ценовой категории. То есть при малом весе обладают отличительным показателем деформации без разрушения, способности сопротивляться разрушению. При конструировании станин оборудования имеют хорошую демпфирующую возможность. При вибрациях способно гасить часть колебаний. К тому же имеют низкую себестоимость. При данных характеристиках суммарные затраты на его производство не превышает предполагаемой выгоды от использования материала. Ферромарганец широко используется на производствах транспорта, при изготовлении медицинских инструментов. При желании в зависимости от требуемых условий эти сплавы легируют алюминием, кобальтом, кремнием и другими [8].

Перед первым изготовлением рабочей модели, мы в условиях нынешнего времени можем предварительно решить задачу на прочность. Имея некоторые гипотезы, мы можем проверить их состоятельность при решении задачи процесса пластической деформации. Предположив, что спроектированная нами модель будет прочной, мы решаем краевую задачу пластической деформации. В ходе которой определяем напряженное и

деформированное состояние в момент времени. Мы рассчитаем возникшие напряжения. Эти расчеты будут вычислены через тензор напряжений и функциями линии движения некоторых точек тела. Имея простую задачу найти напряженное состояние балки, не составит труда решить ее на листе. Для более сложных конструкций потребуется много времени потраченное на вычисление. Их возможно решить вручную, однако это нецелесообразно. С развитием вычислительной техники эти задачи должны математически смоделированы в специальных программных обеспечениях [9].

Предел прочности - механическое напряжение, выше которого происходит разрушение материала. Иначе говоря, это пороговая величина, превышая которую механическое напряжение разрушит некое тело из конкретного материала. Следует различать статический и динамический пределы прочности. Также различают пределы прочности на сжатие и растяжение [10].

В исследовании в качестве эталона взяли Сталь 20ХНР. Микроструктура стали 20ХНР (0,16 % С; 0,7 % Мn; 0,9 % Ni; 0,8 % Cr; 0,002% В, ост. – Fe). Она представляет собой феррит с перлитной структурой.

Область применения: Крупные детали, работающие в условиях ударных нагрузок. Зубчатые колеса, червяки, валы-шестерни, кулачковые муфты, валики, пальцы, втулки и другие.

Микроструктура стали 1М (0,21% С; 0,8% Мn; 0,9% Cr; 0,5% Ni; 0,21% V; ост. – Fe).

Данные с таблицы 1 и таблицы 2, были взяты из ранее опубликованной работы (была предоставлена ссылка).

Таблица 1 – Влияние вида термической обработки на демпфирующие свойства исследуемых сталей [2].

В данной таблице представлены виды термической обработки, для исследуемых сталей. Отжиг выполняют путем нагрева металла до температуры фазовых превращений и последующего медленного охлаждения. Нормализацию применяют, как правило, для устранения в поковках крупнозернистой структуры, образовавшейся в результате вынужденного или случайного увеличения времени нахождения заготовок в печи или в случае окончанияковки при слишком высокой температуре. Закалкой называют операцию нагрева до температуры, на 30...70 ° С превышающей температуру перехода стали в аустенитное состояние, и охлаждения в воде, масле или другой среде с соответствующей для данной стали скоростью. Время выдержки при температуре закалки должно быть достаточным для завершения полного фазового превращения в металле.

Сталь	Внутреннее трение, Q					
	Вид термической обработки					
	Ковка	Отжиг	Нормализация	Закалка	Закалка, низкий отпуск	Закалка, высокий отпуск
20ХНР	0,0266	0,0201	0,0275	0,0322	0,0301	0,0293
1М	0,0401	0,0215	0,0322	0,0391	0,0310	0,0454

Как видно из таблицы 1, диссипативные свойства существенно зависят от вида термической обработки. Виды термической обработки (отжиг, нормализация, отпуск), аннигилирующие несовершенства кристаллической решетки, снижают демпфирующие свойства.

Таблица 2 - Критическая точка для исследуемых сталей [2].

Критические точки стали или точки Чернова - критические температуры, при которых происходит изменение, фазового состояния и структуры стали при нагреве или охлаждении её в твёрдом виде.

Сталь	Критическая точка, °С
20ХНР	790
1М	840

(20ХНР – стандартная сталь, 1М – образец)

Для расчета напряженно-деформированного состояния необходимо воспользоваться программой COMSOL Multiphysics.

Вводим необходимые данные нашей пластины: 60\*20\*6. Далее задаем марку нашей стали, выбираем распределенную нагрузку на всю поверхность, выбираем закрепление по нижней плоскости. Давление равняется 0,5 кПа.

Результаты:

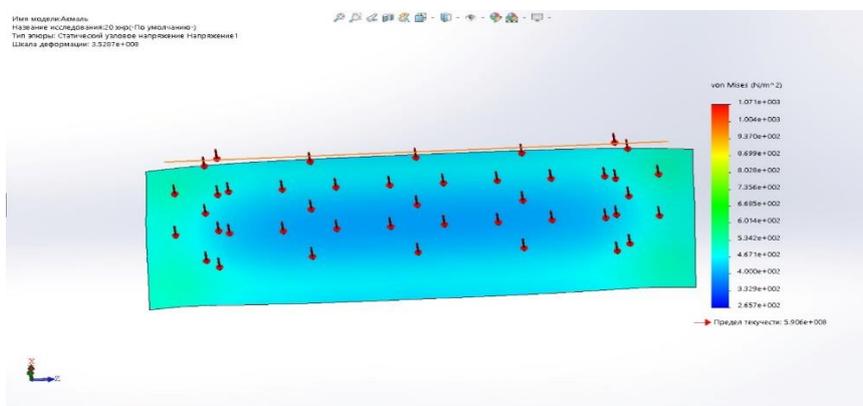


Рисунок 1 – Напряжение для стали 20ХНР

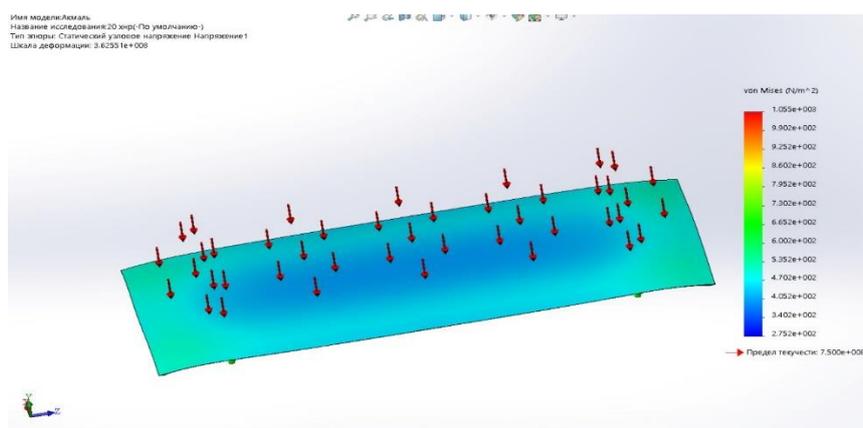


Рисунок 2 – Напряжение для образца 1М

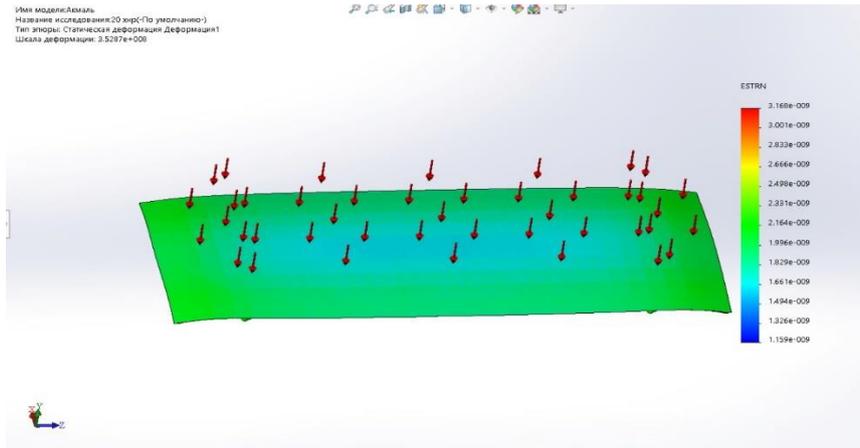


Рисунок 3 – Статическая деформация для стали 20ХНР

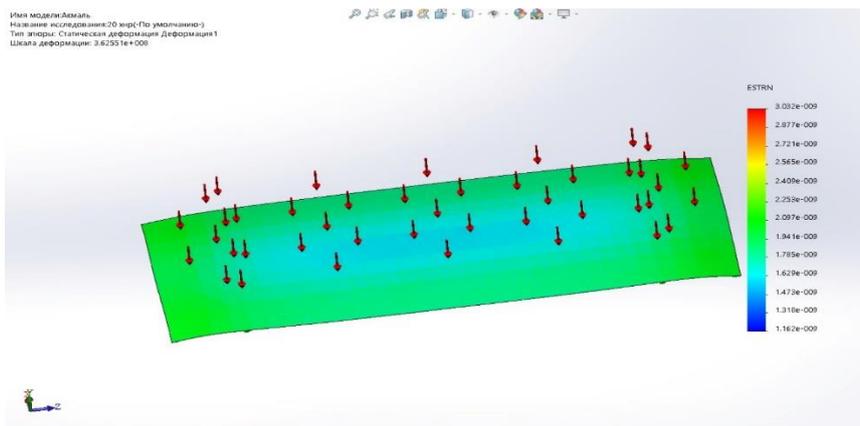


Рисунок 4 – Статическая деформация для образца 1М

Как видно по результатам предел текучести для стали 20ХНР равняется  $5,906e+008$ , а для образца 1М равняется  $7,500e+008$ . Так как предел текучести у образца 1М выше, образец 1М способна дольше находиться в напряженном состоянии.

### Заклучение

В настоящей работе были рассмотрены различные виды термообработки для сталей на основе Fe-Mn.

В ходе исследований для сравнения, были подобраны два вида сталей на основе Fe-Mn и были произведены расчеты на напряженно-деформированное состояние. Как видно по результатам – предел текучести у образца 1М больше, чем у стали 20ХНР. Это означает что, образец 1М способна дольше находиться в напряженном состоянии и противостоять стационарным и динамическим нагрузкам. Получается, что образец 1М устойчивее к стационарным и динамическим нагрузкам, чем образец из стали 20ХНР. Все расчеты были произведены в программе COMSOL Multiphysics. Новизна данной темы заключается в том,

что результаты данных образцов, доказали свою эффективность при стационарных и динамических нагрузках.

Результаты исследований могут быть использованы в отрасли машиностроения. А также возможна разработка нового образца стали 1М, но для этого необходимо пройти ряд испытаний. В целом результаты исследований показали положительный результат.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Александров В.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебное пособие, часть 1. – Архангельск: САФУ, 2015. – 327 с.
2. Алиманова М.У. Разработка вибродемпфирующих сплавов на основе железа, легированных никелем, ванадием и бором: Диссертация. – Алматы: КазНТУ им. К.И.Сатпаева, 2013. – 131 с.
3. Оракбаев Е.Ж. Исследование и разработка эффективных систем управления процессом подземного выщелачивания: Диссертация. – Алматы: КазНТУ им. К.И.Сатпаева, 2017. – 102 с.
4. Гурау С., Гурау Г., Толеа Ф., Попеску Б., Бану М., Буджореану Л.Г. Влияние термической обработки на месте на мартенситное превращение и удельные свойства сплавов Fe-Mn-Si-Cr с памятью формы, обработанных методом интенсивной пластической деформации ВШПТ: Статья – Материалы, 2021. – 14 с.
5. Махди Дехестани, Кевин Трамбл, Хань Ван, Хайян Ван, Лия А.С. Влияние микроструктуры и термической обработки на механические свойства и коррозионное поведение сплав Fe-30Mn, полученный методом порошковой металлургии: Статья - Уэст-Лафайетт: Университет Пердью, 2017. – 42 с.
6. Заплатин В.Н., Сапожников Ю.И. и другие. Основы Материаловедения (металлообработка): Учебник – Москва: Издательский центр “Академия”, 2017. – 272 с.
7. Кушнер В.С. и др. Материаловедение: Учебник. – Омск: Издательство ОмГТУ, 2014. – 252 с.
8. Сунь Лиин Закономерности структурообразования и особенности мартенситного превращения в сплавах систем Mn-Cu и Fe-Mn: Диссертация. – Москва: НИТУ ‘МИСиС’, 2021. – 28 с.
9. Пузанов М.П. Исследование напряженно-деформированного состояния процесса листовой прокатки трансформаторной стали с учетом анизотропии свойств: Диссертация. – Екатеринбург: УФУ имени Б.Н.Ельцина, 2019. – 134 с.
10. Циммерман Р., Гюнтер К. Металлургия и материаловедение: Справочник - Москва: “Металлургия”, 1982. – 480 с.

### **REFERENCES**

1. Aleksandrov V.M. Materialovedeniye i tekhnologiya konstruksionnykh materialov: Uchebnoye posobiye, chast' 1 [Materials Science and Technology of Structural Materials: Textbook]. – Arkhangel'sk: SAFU, 2015. – 327 s. [in Russian]
2. Alimanova M.U. Razrabotka vibrodempfiruyushchikh splavov na osnove zheleza, legirovannykh nikel'em, vanadiyem i borom: Dissertatsiya [Development of vibration-damping iron-based alloys alloyed with nickel, vanadium and boron: Dissertation]. – Almaty: KazNTU im. K.I.Satpayeva, 2013. – 131 s. [in Russian]
3. Orakbayev Ye.ZH. Issledovaniye i razrabotka effektivnykh sistem upravleniya protsessom podzemnogo vyshchelachivaniya: Dissertatsiya [Research and development of effective

- systems for controlling the process of underground leaching: Dissertation] – Almaty: KazNTU im. K.I.Satpayeva, 2017. – 102 s. [in Russian]
4. Gurau S., Gurau G., Tolea F., Popescu B., Banu M., Budzhoreanu L.G. Vliyanie termicheskoy obrabotki na meste na martensitnoye prevrashcheniye i udel'nyye svoystva splavov Fe-Mn-Si-Cr s pamyat'yu formy, obrabotannykh metodom intensivnoy plasticheskoy deformatsii VSHPT: Stat'ya [The Effect of the In-Situ Heat Treatment on the Martensitic Transformation and Specific Properties of the Fe-Mn-Si-Cr Shape Memory Alloys Processed by HSHPT Severe Plastic Deformation] – Materialy, 2021 – 14 s. [in English]
  5. Zaplatin V.N., Sapozhnikov YU.I. i drugiye. Osnovy Materialovedeniya (metalloobrabotka): Uchebnik [Fundamentals of Materials Science (metalworking): Textbook] – Moskva: Izdatel'skiy tsentr “Akademiya”, 2017 – 272 s. [in Russian]
  6. Kushner V.S. i dr. Materialovedeniye: Uchebnik [Material Science: Textbook] – Omsk: Izdatel'stvo OmGTU, 2014 – 252 s. [in Russian]
  7. Sun' Liin Zakonomernosti strukturoobrazovaniya i osobennosti martensitnogo prevrashcheniya v splavakh sistem Mn-Cu i Fe-Mn: Dissertatsiya [Regularities of structure formation and features of martensitic transformation in alloys of Mn-Cu and Fe-Mn systems: Dissertation] – Moskva: NITU ‘MISiS’, 2021 – 28 s. [in Russian]
  8. Makhdi Dekhestani, Kevin Tramb, Khan' Van, Khayyan Van, Liya A.C. Vliyanie mikrostruktury i termicheskoy obrabotki na mekhanicheskiye svoystva i korrozionnoye povedeniye splav Fe–30Mn, poluchenny metodom poroshkovoy metallurgii: Stat'ya [Effects of microstructure and heat treatment on mechanical properties and corrosion behavior of powder metallurgy derived Fe–30Mn alloy: Dissertation] - Uest-Lafayyett: Universitet Perd'yu, 2017 – 42 s. [in English]
  9. Puzanov M.P. Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya protsessa listovoy prokatki transformatornoy stali s uchetom anizotropii svoystv: Dissertatsiya [Study of the stress-strain state of the process of sheet rolling of transformer steel, taking into account the anisotropy of properties: Dissertation] – Yekaterinburg: UFU imeni B.N.Yel'tsina, 2019 – 134 s. [in English]
  10. Tsimmerman R., Gyunter K. Metallurgiya i materialovedeniye: Spravochnik [Metallurgy and Materials Science: A Handbook] - Moskva: “Metallurgiya”, 1982. – 480 s.