

**ISSN 2073-3569**

# **ХЛЕБОПЕЧЕНИЕ РОССИИ**

# **BAKERY OF RUSSIA**

**2023**

**№ 4**

## **Главный редактор журнала**

Битус Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и инжиниринга технических систем, Российский биотехнологический университет, Москва, Россия.

## **Заместитель главного редактора**

Омельченко Олег Михайлович – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры управления бизнесом и сервисных технологий, Российский биотехнологический университет, Москва, Россия.

## **Выпускающий редактор**

Забайкин Юрий Васильевич – кандидат экономических наук, доцент, аналитик, научно-образовательный центр новых информационно-аналитических технологий, аналитики систем управления и организации, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия; доцент кафедры управления бизнесом и сервисных технологий, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия; специалист по организации научно-исследовательской работы, отдел проектной деятельности и подготовки кадров высшей квалификации, Московский государственный гуманитарно-экономический университет, Москва, Россия.

## **Редакционная коллегия**

Алехина Надежда Николаевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Белявская Ирина Георгиевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия.

Березина Наталья Александровна – доктор технических наук, доцент, проректор по цифровизации, научной и инновационной деятельности, Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, Орел, Россия.

Ильина Ольга Александровна – доктор технических наук, профессор, ректор, Международная промышленная академия, Москва, Россия.

Жаркова Ирина Михайловна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Жиров Михаил Вениаминович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной автоматики, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Казарцев Дмитрий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии виноделия, бродильных производств и химии им. Г.Г. Агабальянца, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Краснов Андрей Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Краус Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Ирекс», вице-президент Российского союза пекарей, председатель правления Союза производителей пищевых ингредиентов, председатель рабочей группы по аграрной и пищевой промышленности при Российско-Германской внешнеторговой палате, Барнаул, Россия.

Магомедов Газибег Омарович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Макаров Сергей Васильевич – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии пищевых продуктов и биотехнологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия.

Налиухин Алексей Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры агрономической, биологической химии и радиологии, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

Никитин Игорь Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биотехнологий продуктов питания из растительного и животного сырья, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Пономарева Елена Ивановна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Росляков Юрий Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пищевой инженерии, Кубанский государственный технический университет, Краснодар, Россия.

## СОДЕРЖАНИЕ

Патимат Султановна Батаева, Ахмед Магомедович Гачаев, Хусейн Геланиевич Чаплаев Систематизация термодинамической модели изменения структуры металлов и сплавов при механическом воздействии	6
Елена Сергеевна Жиганова, Мадина Карипулловна Садыгова, Гульнара Адиятовна Бекетова, Сергей Николаевич Сибикеев, Нина Сергеевна Соловова, Никита Александрович Семилет Зависимость цветовых характеристик крупки и макаронных изделий от вида пшеницы	24
Баграт Исменович Сандухадзе, Михаил Александрович Кузьмич, Рамин Закирович Мамедов, Мария Сергеевна Крахмалёва, Валентина Васильевна Бугрова, Ярослав Станиславович Молодовский Продуктивность и хлебопекарное качество зерна сортов и линий озимой мягкой пшеницы селекции «ФИЦ «Немчиновка»	36

## CONTENTS

Patimat S. Bataeva, Akhmed M. Gachaev, Khusein G. Chaplaev Crop forecasting based on cross-regional data	6
Elena S. Zhiganova, Madina K. Sadigova, Gulnara A. Beketova, Sergey N. Sibikeev, Nina S. Solovova, Nikita A. Semilet Dependence of the color characteristics of cereals and pasta on the type of wheat	24
Bagrat I. Sandukhadze, Mikhail A. Kuzmich, Ramin Z. Mamedov, Maria S. Krahmaleva, Valentina V. Bugrova, Yaroslav S. Molodovsky Productivity and baking quality of grain of varieties and lines of winter soft wheat selected by the Federal Research Center «Nemchinovka»	36

**Систематизация термодинамической модели изменения структуры металлов и сплавов при механическом воздействии**

**Патимат Султановна Батаева**

Доцент кафедры бизнес информатики  
Чеченский государственный университет имени А.Х. Кадырова  
Грозный, Россия  
mguspaeva@mail.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

**Ахмед Магомедович Гачаев**

Заведующий кафедрой высшей и прикладной математики  
Чеченский государственный университет имени А.Х. Кадырова  
Грозный, Россия  
gachaev-chr@mail.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

**Хусейн Геланиевич Чаплаев**

Доцент кафедры экономики и управления образования  
Чеченский государственный педагогический университет  
Грозный, Россия  
mguspaeva@mail.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 03.09.2023

Принята 14.10.2023

Опубликована 15.12.2023

УДК 656.1/.5:330.341.1

EDN FKLPSM

ВАК 4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

**Аннотация**

В последнее время разработка теоретических подходов для описания процессов изменения структуры материалов под действием механических воздействий становится всё более актуальной. Предложена термодинамическая модель, которая позволяет однозначно определить ход высоконезквивалированных процессов и охарактеризовать особенности формирования равновесной дисперсной структуры материала во время механической обработки. В качестве независимых параметров модели рассматриваются характеристики дефектов, энтропия и компоненты тензора деформации. В дальнейшем полученные результаты использованы для решения конкретных задач. Цель данной работы – систематизировать имеющиеся представления о термодинамической модели, описывающей изменение структуры металлов и сплавов при механическом воздействии, и изучить особенности и условия формирования равновесных структур различного типа. Таким образом, в рамках двухфакторной модели с учётом плотностей дислокаций и границ зерен построено подробное описание процессов, определяющих условия формирования равновесных структур. Более того, в работе детально рассмотрена эволюция основных типов дефектов и их взаимодействие при достижении стационарного режима, а также установлена зависимость типа равновесной структуры от величины деформации и исходного состояния материала. Выявлено, что изменение состояния системы имеет характер скачкообразных переходов. Из представленных описаний следует, что равновесная структура не

является неизменной, а представляет собой динамическое равновесие процессов генерации и аннигиляции дефектов.

### **Ключевые слова**

архитектура, металл, стойкость, развитие, структура.

### **Введение**

В последнее время большое количество научно-исследовательских работ в промышленно развитых странах посвящено исследованию и технологиям получения ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов (Zeng, 2020). Это обусловлено развитием современного технологического процесса: увеличением силовых и термических нагрузок на оборудование, выполненное из металлов, наличием разнообразных и агрессивных сред их эксплуатации, высокой себестоимостью его изготовления. Таким образом, возникла потребность в улучшении физико-химических свойств материалов, из которых производят машины и устройства, в частности, – в увеличении срока эксплуатации новейших конструкций и их деталей (Ishitsuka, 2015).

Можно выделить два известных механизма формирования наноструктурных материалов, которые отличаются использованием технологий сборки (изготовления) или получением с применением различных методик обработки. С помощью первого метода при разложении, осаждении или синтезе вещества получают разнообразные наночастицы (твёрдотельные нанокластеры, нанопроволоки, нанотрубки), плёнки и покрытия, наноразмерные порошки и комплекующиеся из них материалы, в том числе нанокомпозиты, образованные путём введения наночастиц в различные матрицы (Odermatt, 2020). Второй метод заключается в том, что процесс наноструктурирования происходит в результате сильного влияния на полученные другими методами микроструктурные материалы – отжиг аморфных сплавов, IPD исходной металлической структуры, механохимический синтез. В этом случае имеет место формирование композиционных материалов, содержащих различные аморфные и кристаллические нанофазы (Feng, 2017).

Известно, что в процессе создания наноструктурных материалов путём консолидации частиц и внедрения добавок возникают трудности, связанные с неравномерностью структуры на микро- и наноуровне (Nata, 2015). Кроме того, ограничен размер получаемых образцов и степень практической реализации разрабатываемых технологий. Эти проблемы обусловлены невозможностью обеспечить стабильность структуры в процессе спекания порошков и концентрации добавок, а также внедрить методы в полномасштабное производство.

Эти проблемы в значительной степени удается минимизировать благодаря применению методов импульсно-поточной обработки (IPD). Так, методами IPD получены объёмные образцы из различных металлов и сплавов, включая промышленно востребованные, с наноструктурой (Burkart, 2020). При этом путем варьирования параметров импульсов и потоков удалось обеспечить однородность структуры на микро- и наноуровне. Методы также нашли применение для композиционных материалов и полупроводников, для которых ранее создание объёмных образцов представляло трудности.

Множество экспериментальных исследований посвящено изучению влияния IPD на структуру металлов и сплавов на микро- и наноуровне (Martino, 2020). Однако вопрос определения оптимальных параметров процесса IPD, таких как значения импульсных нагрузок, температур и скоростей потока, для получения структур с заданными свойствами все ещё открыт. Большинство предыдущих работ не уделяли достаточного внимания детальному изучению физических процессов, протекающих на стадии IPD (Jeong, 2016).

В связи с этим развитие теоретических методов для описания структурных преобразований при обработке IPD приобретает весомое значение. Рассмотренные базовые теоретические подходы позволяют раскрыть определённые стороны разнообразного проявления закономерностей в процессах деформации и разрушения твёрдых тел, а также в целом позволяют составить более полное и объективное представление о предмете исследования (Li, 2018).

Ряд вопросов, касающихся интенсивной пластической деформации, сегодня нерешён, а методы исследования в основном сводятся к обобщению экспериментальных данных (Khayatzaheh, 2016). В частности, теоретически не удалось описать формирование «предельной» структуры металлов – минимального среднего размера зерен, а также не была предусмотрена возможность образования нескольких предельных структур (TAKAKI, 2020). Кроме того, не описан ряд явлений, которые часто наблюдаются во время экспериментальных исследований: реализация фазовых превращений, наличие разных режимов процесса фрагментации, формирование фрактальных структур, возникновение нестабильных конфигураций, температурные аспекты проблемы, влияние флуктуаций основных параметров (Winey, 2015). Таким образом феноменологическая модель процесса фрагментации металлов или сплавов при IPD позволяет описать процесс измельчения поликристаллической структуры и формирования предельной SMK или НК-структурой (Yashiro, 2020).

В этой связи предлагается новый подход – TUE, который базируется на комбинации технофазовых преобразований Ландау в приближении среднего поля и положений классической неравновесной термодинамики, что позволяет получить более полную информацию о поведении систем при IPD. В рамках этого концептуального подхода уже рассмотрен ряд задач кинетики дефектов при IPD, в том числе получены законы упрочнения металлов. В то же время недостаточно изученными пока остались: условия формирования предельных SMK или НК-структур нескольких типов; фазовая динамика неравновесных переменных в процессе формирования стационарных SMK или НК-структур; влияние времен релаксации на кинетику системы, что позволяет рассмотреть различные сценарии формирования предельных (стационарных) структур (Mandal, 2017); устойчивость предложенной модели; а также влияние флуктуаций основных параметров, что может существенно изменить характер эволюции системы и привести к образованию качественно новых режимов функционирования и состояний (Banlusan, 2017).

### **Материалы и методы исследования**

На основе фундаментального неравенства, объединяющего первый и второй законы термодинамики, и учитывая основные каналы диссипации энергии в работах, получено обобщённое соотношение Гиббса, что позволяет описать поведение неравновесных систем и определить ход сильно неравновесных процессов: нагрева и генерации структурных дефектов. Кроме того, предложенная теория позволяет правильно отразить эволюцию структурных дефектов в процессе IPD и формирование предельной (стационарной) структуры. Расширение системы независимых термодинамических переменных позволило ввести понятие состояния сильно неравновесной системы.

Механическая работа, продуцируемая в процессе IPD, приводит к росту внутренней энергии металлов. Поскольку процесс протекает достаточно быстро – в пределах доли секунды (один проход в среднем длится  $10^{-2}$ - $10^{-1}$  с), выделенная при IPD теплота не успевает отводиться и процесс протекает в условиях адиабатичности. При этом температура обрабатываемого материала повышается в процессе обработки незначительно, поэтому влияние тепловых эффектов можно не учитывать. Основная часть затрачиваемой работы направляется на изменение структурных дефектов. Описание реального механизма фрагментации представляется достаточно сложной задачей, поскольку в процесс вовлечены дефекты различных уровней (Nagasako, 2016).

Тем не менее для целей моделирования целесообразно предложить упрощенную модель, учитывающую наиболее значимые для формирования мелкозернистой структуры дефекты, существенно влияющие на свойства. При обработке методами импульсно-поточной деформации основную роль играют границы зёрен и дислокации, определяющие степень фрагментации и прочностные характеристики (Shin, 2017). Вклад остальных дефектов можно учесть косвенно – с помощью феноменологических коэффициентов. Таким образом, на данном этапе исследования процесса целесообразно ограничиться двухфакторной моделью с учётом плотностей границ зёрен и дислокаций. Это позволит описать основные закономерности фрагментации металлов и сплавов под действием импульсно-поточной деформации.

### Результаты и обсуждение

Выражение для плотности внутренней энергии в рамках рассматриваемого случая удобно представить в форме полиномиальной зависимости от плотности выбранных двух типов дефектов:

$$u = (h_g, h_D) = u_0 + \sum_{m=g,D} \left( \varphi_{0m} h_m - \frac{1}{2} \varphi_{1m} h_m^2 + \frac{1}{3} \varphi_{2m} h_m^3 - \frac{1}{4} \varphi_{3m} h_m^4 \right) + \varphi_{gD} h_g h_D \quad (1)$$

$$u_0 = \frac{1}{2} M (\varepsilon_{ii}^e)^2 + 2\mu I_2 \quad (2)$$

$$\varphi_{0m} = \varphi_{0m}^* + q_m \varepsilon_{ii}^e + \left( \frac{1}{2} \bar{M}_m (\varepsilon_{ii}^e)^2 + 2\bar{\mu}_m I_2 \right) \quad (3)$$

$$\varphi_{1m} = \varphi_{1m}^* + 2e_m \varepsilon_{ii}^e \quad (4)$$

где  $u_0$  – часть внутренней энергии, которая не зависит от дефектности материала (уровень отсчёта);  $h_g, h_D$  – плотности GB и дислокаций;  $M = \lambda + 2\mu$  – модуль одностороннего сжатия материала;  $\lambda, \mu$  – постоянные Ламе;  $\varepsilon_{ii}^e, I_2 \equiv (-\varepsilon_{ii}^e \varepsilon_{jj}^e + \varepsilon_{ij}^e \varepsilon_{ji}^e)/2$  – первый и второй инварианты тензора упругих деформаций;  $\varphi_{0m}^*$  – собственная энергия дефекта с учётом его размерности (на единицу длины дислокаций  $i$  и поверхностная плотность для МО);  $\varphi_{0m}$  – та же самая энергия с учётом влияния упругих деформаций в линейном (константа  $q_m$ ) и квадратичном приближении; положительная сталь  $q_m$  отвечает за процесс генерации структурных дефектов при растяжении  $\varepsilon_{ii}^e > 0$ , или по их аннигиляции в случае реализации сжатия  $\varepsilon_{ii}^e < 0$ ,  $\bar{\mu}_m$  – упругие стали, которые отражают уменьшение соответствующих упругих модулей, что обусловлено существованием структурных дефектов;  $\varphi_{1m}^*, \varphi_{1m}$  – коэффициенты, отвечающие за процессы рекристаллизации (аннигиляции дефектов) без учёта и с учётом влияния упругой деформации в линейном приближении (константа  $e_m$ ); в соответствии  $e_m$  отражает ускорение процесса аннигиляции при положительном значении  $\varepsilon_{ii}^e > 0$ , в случае отрицательного  $\varepsilon_{ii}^e < 0$  понимается возвратно-направленный процесс; значения индексов  $m = g$  относятся к GB, а  $m = D$  – к дислокациям;  $\varphi_{gD}$  – параметр, отражающий энергию взаимодействия выбранных структурных дефектов. В общем случае положительные вклады в соотношении (1) определяют генерацию структурных дефектов, а отрицательные составляющие отвечают обратным процессам – аннигиляции дефектов (рекристаллизации).

Степенное развитие (1) при условии положительных значений коэффициентов  $\varphi_{km}$  ( $k = 0 - 3$ ) может формировать два максимума. В случае GB максимумы соответствуют образованию двухмодового распределения по размерам зёрен. В случае дислокаций, мода, что соответствует меньшему значению дефектности, описывает случайное (однородное) распределение представленного дефекта, соответственно, большее значение дефектности отражает ансамбль дислокаций, образующих ячеистую структуру.

Отметим, что для описания формирования предельной (стационарной) структуры необходима более высокая степень приближения внутренней энергии (1) по значениям плотности GB, однако в случае дислокаций достаточно ограничиться вносками только до второй степени по плотности дефекта ( $\varphi_{2D} = 0$  Джм<sup>3</sup>,  $\varphi_{3D} = 0$  Джм<sup>5</sup>). Такой выбор позволяет достичь лучшего соответствия с поведением реальных систем при больших пластических деформациях. Чередуемость знаков в круглых скобках (1) отражает принцип Ле-Шателье: термодинамический процесс более высокого уровня направлен на компенсацию эффектов от термодинамических процессов более низкого уровня.

Здесь полная деформация представляется в виде суммы обратной  $\varepsilon_{ij}^e$  (упругой) и необратимой  $\varepsilon_{ij}^e$  (пластической или остаточной) составляющих. С проявлением пластической (остаточной) деформации упругая составляющая не исчезает, однако имеет меньший вклад. Согласно теории упругости вид возникающей деформации определяется в основном характером приложенной к телу нагрузки и формированием соответствующих напряжений  $\sigma$ . Так, преобладание тангенциальных составляющих напряжения  $\sigma_\tau$  (или  $\sigma_{ij}$ ) способствует развитию пластической деформации, а нормальных составляющих  $\sigma_n$  (или  $\sigma_{ii}$ ) приводит к разрыву межатомных связей.

Известно, что пластическая деформация начинает развиваться с достижением механическими напряжениями предела текучести (текучести)  $\sigma_T$ . Считается, что процесс фрагментации металла или сплава при обработке IPD может интенсивно протекать тогда, когда упругие деформации  $\varepsilon_{ij}^e$  и связанные

с ними напряжения  $\sigma_{ij}^e$  превышают эту границу. В случае, когда приложенные напряжения не достигают значения  $\sigma_T$ , процесс фрагментации невозможен, поскольку отсутствует пластическое течение, отвечающее за формирование стационарных состояний.

Поскольку энергия системы не должна зависеть от выбора системы координат, то она выражается через инварианты тензора деформаций. Отметим, что в рамках теории NET значение пластических (накопленных) деформаций  $\varepsilon_{ij}^p$  не представлено в явном виде. Известно, что пластическая деформация проявляется в результате зарождения и движения дислокаций, а также за счёт взаимодействия дефектных подструктур различных уровней, вследствие чего в материале формируется SMK (образуются зёрна со средними размерами  $d = 100 - 10^3$  нм) или NK ( $d \leq 100$  нм) структура.

Отметим, что значения первого и второго инвариантов тензора упругих деформаций  $\varepsilon_{ii}^e$ ,  $I_2$  являются управляемыми параметрами и представляют внешнее механическое воздействие (давление) при IPD. В представленном исследовании рассматривается процесс сжатия деформированного образца (противодавление), поэтому первый инвариант тензора упругих деформаций  $\varepsilon_{ii}^e$  приобретает отрицательные значения. Учитывая это, на начальном этапе обработки, в соответствии с выражением (3), преобладает линейный  $\varepsilon_{ii}^e$  вклад (см. второе слагаемое) и при условии положительного значения константы  $g_m$  сжатия будет приводить к замедлению генерации дефектов. На более поздних стадиях в результате упрочнения будет преобладать квадратичный за  $\varepsilon_{ii}^e$  вклад, что независимо от его знака будет приводить к ускорению процесса образования дефектов. В целом процесс генерации дефектов, который задан коэффициентом (3), на завершающей стадии будет уравновешен процессом их уничтожения (например, в результате рекристаллизации), что описывается коэффициентом (4).

Стоит отметить, что в рамках предложенной теории формирования стационарных состояний двухдефектной системы связано с образованием максимумов внутренней энергии (1) (или (6)), что сильно отличается от классического подхода в рамках равновесной термодинамики, поскольку согласно последней система всегда стремится достичь минимума энергии. Считается, что процесс измельчения металлической структуры при обработке методами IPD соответствует сильно неравновесным процессам, поскольку в системе постоянно происходит перекачка энергии за счёт внешнего воздействия. Вместе с тем известно, что протекание неравновесных процессов невозможно корректно представить, используя общеизвестные классические методы, поэтому в работе развивается новый феноменологический подход, в основе которого введено понятие некоторой «эффективной» внутренней энергии, когда система приходит в стационарных состояниях, которые отвечают максимумам, и представляет собой комбинацию внутренней энергии и энтропийной составляющей. Под формированием максимума внутренней энергии имеется в виду не абсолютный максимум, а лишь максимум в сечении по одной из переменных. Подобный принцип формирования максимальных значений внутренней энергии довольно часто реализуется на практике. Например, в магнетизме такая максимальная внутренняя энергия по магнитному моменту определяет ферромагнитное упорядочение. В теории аморфных сплавов максимум внутренней энергии по концентрации компонентов при положительном знаке энергии смешивания обуславливает упорядочение сплавов. Это свойство внутренней энергии схоже со свойствами термодинамического потенциала, введенными ранее для сильно неравновесных процессов. Тем не менее с точки зрения общепринятого формализма «эффективный» потенциал (1) (или (6)) является некоторой конструкцией, играющей роль аналога и не имеющей физического содержания оригинальной внутренней энергии. В дальнейшем, во избежание недоразумений, отождествим эти два понятия, таким образом, соотношения (1) и (6) будут рассматриваться в качестве внутренней энергии.

Очевидно, что исследуемая модель (1) – (4) содержит много параметров и коэффициентов, физическая интерпретация и значение которых играют важную роль в определении реального процесса фрагментации металла или сплава в условиях IPD. Основной целью теории NET является построение обобщенной термодинамической модели, что позволит провести качественное моделирование процесса обработки металлического образца методами IPD и получить сопоставимые с экспериментальными исследованиями результаты. Однако в настоящее время задачи физической трактовки и введения интервалов, определяющих границы изменения основных параметров теории, ещё мало изучены.

Большинство параметров являются феноменологическими, поскольку достаточно сложно учесть все возможные взаимодействия, происходящие в структуре материала, и, собственно, определить реальные размерности величин, представляющих эти процессы. Технику выбора основных параметров и определения явного физического смысла некоторых из них описаны в работах. Таким образом, коэффициент  $\varphi_{qD}$  в соотношении (1), как уже отмечалось ранее, отражает энергию взаимодействия между дефектами данной системы. Переменную  $\varphi_{om}(m = q, D)$ , что определяется соотношением (3), можно интерпретировать как общую поверхностную плотность энергии для соответствующего вида дефекта. Первые слагаемые  $\varphi_{om}^*$  в определении (3) представляют собственную энергию дефектов с учётом размерности при отсутствии других воздействий, их поверхностная энергия минимальна по отношению ко всей энергии рассматриваемой поверхности материала. В работах общая поверхностная энергия регулярной (бесконечной) GB для меди во время холодной обработки приобретает удвоенное значение от энергии свободной границы рассматриваемого образца (примерно  $2 \times 2 = 4$  Дж/м<sup>2</sup>). Вместе с тем значение собственной энергии, что можно рассматривать как энергию хорошо ослабленной GB, составляет 15-20% от энергии свободной поверхности (для меди – примерно  $\varphi_{oq}^* = 0,2 \times 2 = 0,4$  Дж/м<sup>2</sup>) (см. таблицу 1).

В поле сжимающих гидростатических напряжений, что определяется отрицательными значениями первого инварианта тензора упругих деформаций  $\varepsilon_{ij}^e < 0$ , второе слагаемое в соотношении (3) наряду с коэффициентом  $g_m$ , обуславливает негативный вклад в определении общей поверхностной энергии  $\varphi_{om}$  для обоих типов дефектов.

В случае GB, поскольку этот вид двумерного дефекта представляет некоторое распределение вдоль сильно искаженной области кристаллической решетки, именно неравновесность этой области больше всего влияет на определение энергии предела. Под воздействием механического напряжения объём этих разуплотненных областей может уменьшаться. Таким образом, имеет место процесс аннигиляции или подтормаживания генерации дефектов, что, собственно, и приводит к уменьшению поверхностной энергии GB. Рассматривая обработку медного образца, для упругой деформации  $\varepsilon_{ij}^e = 0,2\%$ , которой соответствует напряжение  $\sigma_{ij} \approx 180$  МПа, значение для коэффициента  $g_g$  (то есть уменьшение энергии GB) определяется в пределах 10 % от хорошо распределенной GB (то есть  $g_g = 12$  Дж/м<sup>2</sup>) (см. таблицу 1).

Аналогичное рассуждение позволило установить, что переменные  $\bar{M}_g$  и  $\bar{\mu}_g$  для напряжения порядка 180 МПа не должны превышать значение общей эффективной поверхностной энергии  $\varphi_{og}$ , что в случае меди – двойной свободной энергии границы 4 Дж / м<sup>2</sup>. Таким образом, принимаются значения  $\bar{M}_g = 2,5 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup> и  $\bar{\mu}_g = 3 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup> (см. таблицу 1). Основное различие между значениями представленных коэффициентов заключается в том, что учёт сдвиговых упругих деформаций является более весомым в процессе фрагментации металлической структуры, поскольку именно сдвиговые деформации отвечают за формирование и дальнейшую эволюцию дефектной подструктуры.

Определение основных оценок дислокационной подструктуры проводится аналогичным образом. Так, для медного образца минимальная избыточная энергия для дислокации при отсутствии других воздействий составляет  $\varphi_{oD}^* = 5 \cdot 10^{-9}$  Дж / м. Вместе с тем параметр, который отвечает за взаимодействие дислокаций и МО, имеет значение  $\varphi_{gD} = 10^{-16}$  Дж (см. таблицу 1).

В целом выбор значений основных постоянных теории осуществляется феноменологически, исходя из необходимости формирования стационарных SMK или NK структур, которые наблюдаются в ряде экспериментальных работ. Например, установка стационарных значений для плотности GB реализуется в пределах  $h_g^{st1} = 10^4 \text{ м}^{-1}$  и  $h_g^{st2} = 10^7 \text{ м}^{-1}$ , для которых характерны средние размеры зёрен 100 мкм и 100 нм. Плотность дислокаций для SMK и NK структур в среднем приобретает равновесных значений при  $h_g^{st1} = 10^4 \text{ м}^{-1}$  и  $h_g^{st2} = 10^7 \text{ м}^{-1}$ .

Исходя из вышеизложенного, в таблице 1 предлагается следующий набор основных параметров и коэффициентов теории, что, в отличие от предыдущего набора параметров, устоявшихся в работах, демонстрирует только количественные соотношения и учитывает реально наблюдаемые закономерности в процессе обработки металла или сплава методами IPD.

Таблица 1. Параметры двухдефективной модели

$M = \mu$	$\varphi_{0g}^*$	$q_g$	$\bar{M}_g$	$\bar{\mu}_g$	$\varphi_{1g}^*$	$e_g$	$\varphi_{2g}$
$2,08 \cdot 10^{10}$ Па	$0,4 \text{ Дж м}^{-2}$	$12 \text{ Дж м}^{-2}$	$2,5 \cdot 10^5$ $\text{Дж м}^{-2}$	$3 \cdot 10^5$ $\text{Дж м}^{-2}$	$3$ $\cdot 10^{-6}$ $\text{Дж м}^{-1}$	$3,6$ $\cdot 10^{-4}$ $\text{Дж м}^{-1}$	$5,6$ $\cdot 10^{-13}$ $\text{Дж}$
$\varphi_{3g}$	$\varphi_{0D}^*$	$g_D$	$\bar{M}_D$	$\bar{\mu}_D$	$\varphi_{1D}^*$	$e_D$	$\varphi_{gD}$
$3 \cdot 10^{-20}$ $\text{Дж м}$	$5 \cdot 10^{-9}$ $\text{Дж м}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-8}$ $\text{Дж м}^{-1}$	$0$ $\text{Дж м}^{-1}$	$1,65$ $\cdot 10^{-4}$ $\text{Дж м}^{-1}$	$10^{-24}$ $\text{Дж м}$	$6 \cdot 10^{-23}$ $\text{Дж м}$	$10^{-16}$ $\text{Дж}$

Дифференцируя базовый энергетический потенциал для плотности внутренней энергии (1), получаем эволюционные уравнения для неравновесных переменных:

$$\tau_{h_m} \frac{\partial h_m}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial h_m} \quad (5)$$

где  $\tau_{h_m}$  – обратно пропорциональные величины кинетических коэффициентов, которые имеют смысл времени релаксации соответствующих дефектных подструктур и отражают инерционные свойства системы;  $h_m$  – плотности дефектов ( $m = g, D$ );  $\bar{u}$  – эффективная внутренняя энергия, которая в данном случае определяется соотношением:

$$\bar{u} = u - \sum_{m=g,D} \varphi_m^{st} h_m \quad (6)$$

где  $\varphi_m^{st}$  – энергия дефекта  $m$ -го типа в стационарном состоянии. В такой формулировке стационарные состояния будут определяться максимумами эффективной внутренней энергии. Уравнение (5) описывает предэмпирированную и детерминистическую динамику для несохранных и однородных параметров порядка. Преобразование (6) можно интерпретировать как аналог преобразования Лежандра в равновесной термодинамике. В таком случае слагаемые под знаком суммы представляют собой связанную дефектами энергию, а эффективная внутренняя энергия  $\bar{u}$  является аналогом свободной энергии, что также обладает экстремальными свойствами.

Таким образом, в приближении двухдефектной модели уравнения (5) с учётом определений (1) и (6) приобретают явный вид:

$$\tau_{h_D} \frac{\partial h_D}{\partial t} = \varphi_{0D} - \varphi_{1D} h_D + \varphi_{gD} h_g \quad (7)$$

$$\tau_{h_g} \frac{\partial h_g}{\partial t} = \varphi_{0g} - \varphi_{1g} h_g + \varphi_{2g} h_g^2 - \varphi_{3g} h_g^3 + \varphi_{gD} h_D \quad (8)$$

Поскольку стационарные значения входят в комбинации с линейным по плотностям дефектов взносам, то без ущерба для общности их можно объединить с соответствующими коэффициентами

Аналитическое решение нормальной системы двух ODU первого порядка достаточно сложно получить, поэтому применим адиабатическое приближения  $\tau_{h_g} \gg \tau_{h_D}$ , что определяет характер эволюции неравновесных переменных  $h_m$  ( $m = g, D$ ) в рамках принципа подчинения. Таким образом, на всем временном интервале изменение плотности дислокаций следует исключительно за преобразованиями плотности GB. Положив в уравнении (7)  $\tau_{h_D} \approx 0$  и произведя некоторые преобразования, получаем уравнения типа Ландау – Халатникова:

$$\tau_{h_g} \frac{\partial h_g}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial h_g} \quad (9)$$

где производная в правой части задается соотношением:

$$F(h_g) = \varphi_{0g} + \varphi_{gD} \frac{\varphi_{0D}}{\varphi_{1D}} - \left( \varphi_{1g} - \frac{\varphi_{gD}^2}{\varphi_{1D}} \right) h_g + \varphi_{2g} h_g^2 - \varphi_{3g} h_g^3 \quad (10)$$

под влиянием которой переменная  $h_g$  направляется к притягательному аттрактору – предельной структуре. Известно, что на начальных этапах обработки методом импульсно-поточной деформации происходит дезинтеграция исходной зернистой структуры образца. Однако при достаточно большом числе циклов деформирования размеры зёрен и параметры дефектной структуры стабилизируются.

В литературе такая структура, формирующаяся в установившемся режиме деформации, получила название «предельной». С точки зрения физического описания процесса более уместно использовать термин «стационарная структура». При этом система характеризуется эффективным потенциалом, определяющим равновесное состояние при данных внешних воздействиях. В частности, потенциал отражает баланс процессов дезинтеграции и рекристаллизации, приводящих систему к стационарному состоянию. Вместе с тем система характеризуется эффективным потенциалом:

$$V(h_g) = \int_0^{h_g} F(h'_g) dh'_g \quad (11)$$

что совпадает с соотношением (1) для представленного типа дефекта.

Принципиальная возможность реализации тех или иных состояний дефектной структуры в первую очередь определяется характером деформации и активизируемыми на микроуровне взаимодействиями. На начальных этапах обработки эффективным механизмом рассеяния энергии выступает увеличение протяженности границ зёрен. Однако при достижении ультрадисперсной структуры с размерами зёрен порядка 100 нм роль других дефектов, таких как тройники, возрастает. Это может привести к формированию состояний с ещё более мелкими кристаллитами. В дальнейшем активизируются процессы рекристаллизации и коалесценции зёрен, направленные на снижение концентрации дефектов. В установившемся режиме обработки эти процессы динамически балансируются, превращая энергию внешних воздействий в тепло. Так формируется стационарное состояние системы.

Используя необходимое условие существования экстремумов ( $\partial V / \partial h_g = 0$ ), определим экстремумы эффективного потенциала  $V(h_g)$  (11). Положив в соотношении (9)  $\tau_{h_g} \dot{h}_g = 0$ , получаем кубическое уравнение:

$$\varphi_{3g} h_g^3 - \varphi_{2g} h_g^2 + \left( \varphi_{1g} - \frac{\varphi_{gD}^2}{\varphi_{1D}} \right) h_g - \varphi_{0g} - \varphi_{gD} \frac{\varphi_{0D}}{\varphi_{1D}} = 0 \quad (12)$$

В общем случае уравнение (12) может иметь три различных решения: два устойчивых состояния (то есть формируются две предельные структуры) и одно неустойчивое. Устойчивые состояния соответствуют максимумам эффективного потенциала (11), неустойчивый – минимуму  $V(h_g)$ . Как известно по основной теореме алгебры, уравнение (12) будет всегда иметь хотя бы один действительный корень (то есть всегда будет существовать хотя бы одно решение, в данном случае – стационарная структура). Другие два корня могут быть как действительными (в зависимости от знака определителя кубического уравнения – кратными или разными), так и парой комплексно-сопряженных решений.

Очевидно, что положение экстремумов эффективного потенциала  $V(h_g)$  напрямую зависят от параметров задачи  $\varphi_{0g}, \varphi_{1g}, \varphi_{2g}, \varphi_{3g}, \varphi_{0D}, \varphi_{1D}$ , наряду с упругими деформациями  $\varepsilon_{ij}^e$ , и не зависят от начального значения энергии  $u_0$  (уровня отсчёта энергии в выражении (2)). Вместе с тем сложившиеся экстремальные значения ПП  $h_g$  позволяют однозначно определить возможные режимы фрагментации металла или сплава в процессе обработки методами IPD. Следует отметить, что рассмотренное выше адиабатическое приближение ( $\tau_{h_g} \gg \tau_{h_D}$ ) не влияет на уравнение (12): полученное выражение является точным. Что справедливо, поскольку решения системы ODU (7), (8) рассматриваются в длительной асимптотике, когда реализуются стационарные условия для обоих типов дефектов (то есть система функционирует в стационарном состоянии).

Стоит отметить, что реализация первого максимума эффективного потенциала  $V(h_g)$  (11) заметно зависит от упругой деформаций  $\varepsilon_{ij}^e$  (значений первого и второго инвариантов), в то время как второй – нечувствителен к возникающим напряжениям и связанным с ними деформациями. Это обусловлено точностью учёта упругих деформаций  $\varepsilon_{ij}^e$  в степенном развитии внутренней энергии (1) – (4). Рассматриваемые деформации введены только во 2-ю степень по плотности дефектов  $h_m$  в соотношении (1), имеющих наибольшее влияние на формирование первого максимума. Такое приближение осуществлено в силу сохранения примерно одинакового порядка во всем соотношении для внутренней энергии (1). Суммарный порядок первых двух взносов по плотности дефектов  $h_m$  и упругим

деформациям  $\varepsilon_{ii}^e$ ,  $l_2$  примерно равен порядку последних двух, не учитывающих значения деформации. Однако, если эксперимент покажет значительную чувствительность второго максимума до упругих деформаций, то, соответственно, такое поведение может быть учтено более высокими степенями приближения по  $\varepsilon_{ii}^e$  и  $l_2$  в коэффициентах при  $h_m^3$  и  $h_m^4$ , которые представлены в соотношении для внутренней энергии (1).

На рисунке 1 показана зависимость стационарного значения плотности границ зёрен, полученная путём решения уравнения (12), от влияющего параметра  $l_2$  при различных значениях первого инварианта деформации  $\varepsilon_{ii}^e$ . Следует отметить, что в данном исследовании не рассматривается вопрос о методах достижения значений управляющих параметров. В ряде работ показано, что эти величины могут формироваться самосогласованно на основе соотношений Тейлора. Основной же целью является определение стационарных состояний системы, удовлетворяющих условию минимума свободной энергии при заданных значениях внешних воздействий, описываемых параметрами  $\varepsilon_{ii}^e$  и  $l_2$ . Это позволяет охарактеризовать установившуюся дефектную структуру.

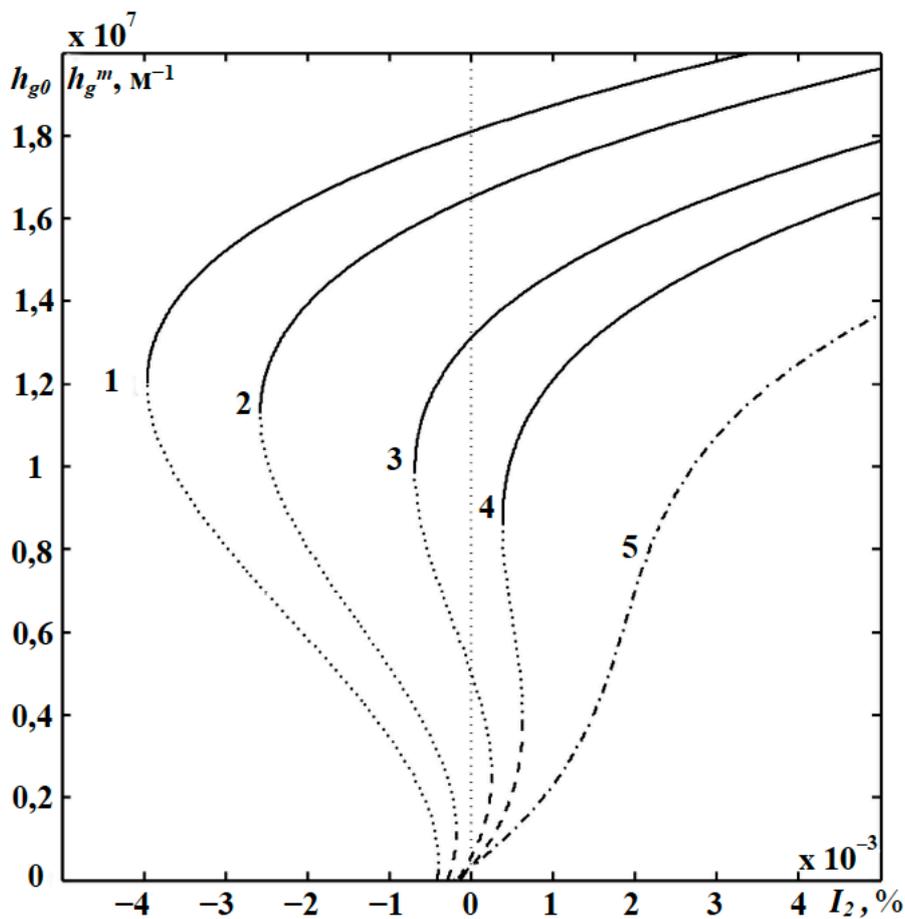


Рисунок 1. Зависимость стационарных значений плотности GB  $h_{g0}, h_g^m \text{ м}^{-1}$  от второго инварианта тензора деформаций  $I_2 \%$ . Кривые 1-5 соответствуют значениям первого инварианта  $\varepsilon_{ii}^e = (-0,35; -0,25; -0,1; -0,001; 0,2) \%$

Таким образом, в поле сжимающих упругих деформаций ( $\varepsilon_{ii}^e < 0$ ) при выбранных параметрах теории (см. таблицу 1) уравнение (12) имеет три решения (кривые 1-4 на рис. 1), что соответствует формированию двух устойчивых стационарных состояний (максимумов  $V(h_g)$ ) и одного неустойчивого (минимума  $V(h_g)$ ). Устойчивые состояния представлены штриховыми и сплошными сегментами на кривых 1-4, а неустойчивые – отражены, соответственно, пунктирными участками. Реализация первого максимума эффективного потенциала, в зависимости от значений второго инварианта  $l_2$ , может

осуществляться как при  $h_g = 0$ , так и при ненулевых значениях плотности GB. Кроме того, ненулевые значения  $h_g^m$  начинают формироваться только в том случае, когда упругие деформации  $\varepsilon_{ij}^e$  достигают определённой критической величины, соответствующей пределу текучести  $\sigma_T$  (текучести). Как отмечалось ранее, это условие необходимо для активации процесса фрагментации кристаллитов в металлической структуре во время IPD.

На рисунке 1 видно, что штриховые участки на кривых 1-4 соответствуют меньшим стационарным значениям  $h_{g0}$  и, соответственно, определяют реализацию монокристалла или CZPK. Сплошные участки на кривых отражают большие значения дефектности материала  $h_g^m$  и соответствуют формированию мелкозернистых SMK или НК-структур. Указанные устойчивые стационарные конфигурации разделяются неустойчивыми состояниями или фазами  $h_g^m$  (см. пунктирные части кривых 1-4 на рис. 1), соответствующими формированию минимумов эффективного потенциала  $V(h_g)$ .

Считается, что материал до начала процесса разделки является монокристаллом или CZPK. С повышением упругих деформаций сдвига, то есть с повышением значений  $l_2$ , на начальном этапе система некоторое время будет функционировать в устойчивом состоянии с низким уровнем плотности дефектов (реализуется первый максимум  $V(h_g)$  при  $h_{g0} \approx 0$ ). На этой стадии процесс фрагментации не может произойти, поскольку величина возникающих напряжений в структуре материала недостаточна для активации внутренней перестройки образца (не возникает пластическое течение) и формирования предельной структуры. Активная стадия процесса измельчения зернистой структуры образца начнёт протекать исключительно при условии возникновения SPT, что заключается в переходе от нулевого значения максимума эффективного потенциала  $V(h_g)$  до ненулевого (см. штриховые сегменты кривых 1-4 на рис. 1). Следует отметить, что при наличии двух максимумов эффективного потенциала в зависимости от плотности дефектов непрерывный процесс фрагментации также невозможен. Это обусловлено существованием конечного потенциального барьера, как показано на рисунке пунктирными фрагментами кривых 1-4.

При дальнейшем росте влияющего параметра происходит слияние первого максимума с энергетическим минимумом. Система теряет устойчивость и резко переходит в область более высокой плотности дефектов, что изображено на кривых сплошными отрезками. Такой переход, обозначаемый как FP1, соответствует интенсивной стадии фрагментации с уменьшением размера зёрен и повышением свойств. В данном случае FP1 система может сосуществовать в двух метастабильных состояниях с различными структурами зёрен. Это соответствует реализации двух максимумов энергетического потенциала.

Таким образом, видно, что процесс фрагментации металлической структуры начнёт протекать только при условии реализации перехода от нулевого значения максимума эффективного потенциала  $V(h_g)$  до ненулевого, и в случае, когда при определенных условиях (значений управляющих параметров) исчезает потенциальный барьер, что разделяет устойчивые состояния. В целом, рассматривая процесс упругого сжатия металлического образца, что реализуется при  $\varepsilon_{ii}^e < 0$ , очевидно, что кривые 1-4 на рисунке 1 характеризуются подобным поведением. Однако случай, представленный кривой 4, отличается, поскольку одновременное сосуществование нулевого и ненулевого максимумов эффективного потенциала невозможно. Кроме того, стоит отметить, что уменьшение по абсолютной величине вноса относительной деформации сжатия  $\varepsilon_{ii}^e$  приводит к уменьшению области неустойчивого существования решения уравнения (12) (см. пунктирные части кривых 1-4 на рис. 1). Следовательно, при малых значениях нормального давления для реализации SPT необходимы большие значения сдвиговых деформаций. Таким образом, с увеличением давления порог перехода к мелкозернистому состоянию уменьшается, что подтверждают экспериментальные исследования.

Однако, как видим, в поле действия сжимающих напряжений  $\sigma_{ii}^e < 0$  и связанных с ними деформаций энергетический «барьер» не исчезает. Только в ходе исследования обратного процесса, происходящего при деформации растяжения  $\varepsilon_{ii}^e > 0$ , уравнение (12) имеет одно решение (см. кривую 5 на рис. 1). В рамках механизма FP2 реализуется постепенный переход от однородной монокристаллической или крупнозернистой структуры к более дисперсной мелко- и нанокристаллической. Следует учесть, что рассмотрение процесса растяжения выходит за рамки

рассматриваемой модели. При деформации на растяжение могут активизироваться и другие дефекты, например, трещины, приводящие к преждевременному разрушению.

Для материала с исходно повышенной концентрацией структурных дефектов формирование равновесного стационарного состояния с более мелкой зернистой структурой возможно уже при небольших положительных значениях параметра деформации. Это связано с наличием большего количества источников для интенсивной фрагментации в ходе импульсно-поточной деформации  $I_2$  (см. кривую 4 на рис. 1): реализуется близкое к ненулевому экстремуму максимальное значение  $V(h_g)$ . Однако в случае уменьшения положительной величины  $I_2$  или действия гидростатического давления, что сопровождается возникновением отрицательных деформаций сдвига ( $I_2 < 0$ ), наблюдается уменьшение плотности GB за счёт увеличения размеров кристаллитов (см. кривые 1-3 на рис. 1). Такое поведение очень часто случается на практике при обработке материала методами IPD.

Отметим, что знак второго инварианта  $I_2$  демонстрирует направление возникновения упругих напряжений и связанных с ними деформаций в материале. В то же время формирование положительных или отрицательных значений можно объяснить с помощью анализа вносов компонентных составляющих, входящих в определение второго инварианта тензора упругих деформаций. Таким образом, преобладание сдвиговых компонент тензора деформаций, которые согласно теории упругости способствуют развитию пластической деформации, будет приводить к положительному взносу в соотношении (А.3). С этой позиции преобладание нормальных составляющих даёт отрицательный вклад. В работе подобный принцип отображается при условии реверсирования деформации, что приводит к разрядке дислокационных скоплений. В то же время процесс измельчения зёрен при деформациях отрицательного знака начинается только после образования достаточного количества новых дислокационных соединений. Таким образом, утверждается, что реверсирование приводит к «лофту» при деформации, что уменьшает ее эффективность с точки зрения процесса фрагментации. Однако сделать однозначный вывод относительно вносов нормальных и тангенциальных составляющих невозможно, поскольку нужно проводить дополнительные исследования.

С физической точки зрения отрицательные значения  $I_2$  имеют природу гидростатического давления (противодействия), поскольку нормальные деформации препятствуют формированию сдвиговых компонент тензора. Согласно определению, второй инвариант в этом случае отражает формирование отрицательных углов между осями деформирования, что на практике может привести к уплотнению и росту зёрен за счёт реализации механизма рекристаллизации или опалесценции. С уменьшением отрицательных значений  $I_2$  (или с повышением по абсолютной величине гидростатического давления) процессы, протекающие внутри металлической структуры, сопровождающиеся понижением внутренней энергии. Считается, что в поле действия сжимающих нормальных и тангенциальных напряжений, в случае, когда второй инвариант имеет отрицательные значения ( $I_2 < 0$ ), атомарные плоскости сжимаются (то есть кристаллическая структура металла или сплава осуществляет перераспределение), формируя новые высокоэнергетические кластерные соединения. Вместе с тем происходит весомое уменьшение поверхностной энергии GB. Также возможны мартенситные превращения, которые сопровождаются изменением типа кристаллической решетки материала (например, переходом с GSSHU к GCK или ОСК решетки) за счёт избыточной внутренней энергии, получаемой системой от внешнего источника (установки IPD). Однако на данном этапе исследования сделать однозначный вывод в отношении влияния нормальных и тангенциальных составляющих тензора упругой деформации на структуру материала невозможно, поскольку для этого нужно проводить дополнительный анализ.

Согласно рисунку 1, если образец обладает высокой концентрацией MO, то с повышением по абсолютной величине отрицательных значений второго инварианта наблюдается уменьшение плотности GB за счёт роста кристаллитов (штриховые и сплошные части кривых 1-3 на рис. 1). Иными словами, реализуется обратный процесс – изнеможение. В случае увеличения оползневой деформации дефектность в материале возрастает, что, наоборот, сопровождается укреплением структуры и улучшением физико-механических свойств. Эти закономерности обычно встречаются на практике, например, при обработке стали методом всестороннейковки. В основе этого метода лежит многократное

повторение свободнойковки наряду с изменением направления приложения деформации, в результате чего обработка сопровождается динамическими процессами рекристаллизации.

Также в работе, при изучении процесса консолидации меди в условиях IPDK, наблюдаются несколько механизмов роста зерен, которые по-разному проявляются в зависимости от сформированных размеров кристаллитов. Основной причиной роста зёрен, согласно эксперименту, являются процессы рекристаллизации в результате динамической миграции GB и коалесценции соседних зёрен вследствие совпадения их разориентирования во время IPD. Также в работе при исследовании IPD Al-сплавов выявлено, что процесс формирования SMK и NK состояний в зависимости от условий обработки имеет циклический характер и происходит за счёт измельчения зернистой структуры или динамической рекристаллизации. Так, в соответствии с количеством проходов и скоростью обработки  $N \leq 2$ ,  $V \leq 300$  м/с формирование SMK структуры происходит путём фрагментации ячеек за счёт изгиба кристаллической решетки и изменения ротационных мод деформации. В результате образованная по такому механизму структура состоит из кристаллитов, разделённых крупноугольными неравновесными границами и содержащих накопление дислокаций. При условии  $V \geq 300$  м/с и  $N \geq 4$  формирование SMK структуры является результатом протекания обратных процессов и непрерывной динамической рекристаллизации.

Рассматривая общую закономерность процессов IPD, в зависимости от характера приложенных сил, на начальной стадии в материале возникают сильные инерционные силы (сопротивление), поскольку межзатомные связи противодействуют приложенным механическим напряжениям. Однако со временем, за счёт работы внешних сил и сопровождающих релаксационных процессов, химические связи ослабевают, что сопровождается уменьшением энергетического «барьера» эффективного потенциала. В результате дальнейшие нагрузки приводят к реорганизации атомной структуры за счёт фрагментации зёрен (постепенно формируется SMK или NK структура).

Поскольку различные напряжения  $\sigma_{ij}$  и связанные с ними упругие деформации  $\varepsilon_{ij}^e$  приводят к формированию областей с соответствующими плотностями GB  $h_g$ , возникает вопрос изучения закономерностей, которые позволили бы однозначно установить связь между упругими деформациями и формированием SMK или NK структур.

Проведём исследование потери устойчивости стационарных состояний  $h_g^m$  (решений уравнения (12)), соответствующих экстремумам эффективного потенциала  $V(h_g)$ , и определим критические значения  $I_2$ , позволяющие осуществить переход между стационарными состояниями уравнения (12). Таким образом, найдём области формирования различных предельных структур в зависимости от значений первого и второго инвариантов  $\varepsilon_{ii}^e, I_2$ .

Положив  $h_g = 0$  в уравнении (12), запишем условие формирования нулевого максимума эффективного потенциала  $V(h_g)$  (11).

$$(\varphi_{0g} + \varphi_{gD} \frac{\varphi_{0D}}{\varphi_{1D}}) \quad (13)$$

Согласно последнему, критическое значение для второго инварианта приобретает вид:

$$I_2^c(\varepsilon_{ii}^e) = -\frac{1}{2(\varphi_{1D}\bar{\mu}_g + \varphi_{gD}\bar{\mu}_D)} \left[ \left( \frac{1}{2}\bar{M}_{g\varphi_{1D}} + \frac{1}{2}\bar{M}_{D\varphi_{gD}} \right) (\varepsilon_{ii}^e)^2 + (g_g\varphi_{1D} + g_D\varphi_{gD})\varepsilon_{ii}^e + (\varphi_{0g}^*\varphi_{1D} + \varphi_{0D}^*\varphi_{gD}) \right] \quad (14)$$

Соотношение (14) в координатах  $\varepsilon_{ii}^e - I_2$  представлено кривой 1' на рисунке 2. Она отражает критический уровень для реализации первого максимума эффективного потенциала  $V(h_g)$  при  $h_{g0} = 0$ . Для значений  $I_2$ , взятых ниже этой кривой, могут образовываться нулевые стационарные развязки  $h_{g0}$ . При превышении этого критического уровня формируются, соответственно, только ненулевые устойчивые состояния системы. Поскольку  $\varepsilon_{ii}^e$  является аргументом выражения (14), отсюда следует, что все кривые на рисунке 1 начинают формироваться в разных точках. Очевидно, что деформации, которые определяются соотношением (14), играют роль предела текучести, поскольку процесс фрагментации начинает протекать только после достижения упругими сдвиговыми деформациями представленных значений.

Критические значения реализации других решений стационарного уравнения (12) находим с помощью необходимого условия существования экстремумов (производная по  $h_g$  от (12))

$$3\varphi_{3g}h_g^2 - 2\varphi_{2g}h_g + \left(\varphi_{1g} - \frac{\varphi_{gD}^2}{\varphi_{1D}}\right) = 0 \quad (15)$$

Очевидно, что решения этого квадратного уравнения (15) позволяют получить предельные стационарные соотношения для плотности GB, разделяющие минимум и ненулевые максимумы эффективного потенциала:

$$h_g^{c1,2} = \frac{2\varphi_{2g} \pm \sqrt{4\varphi_{2g}^2 - 12\varphi_{3g}\left(\varphi_{1g} - \frac{\varphi_{gD}^2}{\varphi_{1D}}\right)}}{6\varphi_{3g}} \quad (16)$$

Для определения критических значений второго инварианта, что отвечают  $h_g^{c1,2}$ , выразим  $I_2$  из уравнения (12):

$$I_2(\varepsilon_{ii}^e, h_g^c) = -\frac{1}{2(\varphi_{1D}\bar{\mu}_g + \varphi_{gD}\bar{\mu}_D)} \left( \frac{1}{2}\bar{M}_g\varphi_{1D} + \frac{1}{2}\bar{M}_D\varphi_{gD} \right) (\varepsilon_{ii}^e)^2 + (g_g\varphi_{1D} + g_D\varphi_{gD})\varepsilon_{ii}^e + \varphi_{0g}^*\varphi_{1D} + \varphi_{0D}^*\varphi_{gD} - (\varphi_{1g}\varphi_{1D} - \varphi_{gD}^2)h_g^c + \varphi_{1D}\varphi_{2g}(h_g^c)^2 - \varphi_{1D}\varphi_{3g}(h_g^c)^3 \quad (17)$$

Осуществляя подстановку значений (16) к выражению (17), получаем пределы потери устойчивости стационарных состояний системы (решений уравнения (12)) и, соответственно, экстремумов эффективного потенциала  $V(h_g)$ .

Таким образом, полученные зависимости (14) и (17) при подстановке значений (16) определяют PD режимов фрагментации металла или сплава (рис. 2). Сходящиеся линии соответствуют предельным значениям пунктирных сегментов (см. рис. 1), рассчитываемых для определённого диапазона  $\varepsilon_{ii}^e$ . Кроме того, точка, в которой сходятся эти кривые, отражает предел исчезновения минимума эффективного потенциала (энергетического «барьера»).

Видно, что PD на рисунке 2 образует четыре области фрагментации металлических образцов. Вместе с тем поведение эффективного потенциала  $V(h_g)$  (11) в каждой области представлено соответствующими кривыми на рисунке 3. Следовательно, формирование стационарных состояний или максимумов  $V(h_g)$  определяется с помощью управляющих параметров теории значений  $\varepsilon_{ii}^e$  и  $I_2$ .

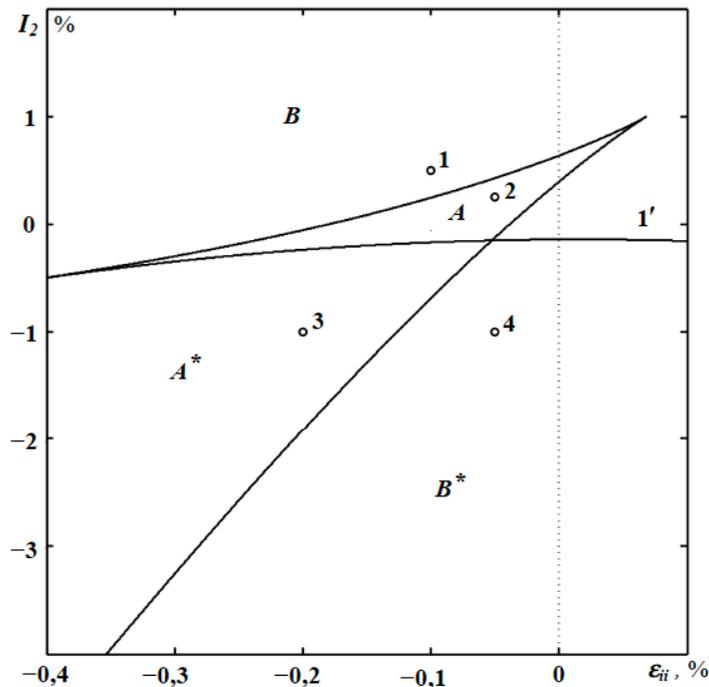


Рисунок 2. Фазовая диаграмма режимов фрагментации с областями формирования двух ( $A, A^*$ ) и одной ( $B, B^*$ ) предельных структур

В области А реализуются два ненулевых максимума эффективного потенциала (кривая 2 на рис. 3). Вместе с тем возможно одновременное сосуществование двух предельных структур с большими размерами зёрен (первый максимум) и более мелкой SMK или НК-структурой (второй максимум). Область А\* существенно отличается от области А тем, что первый максимум эффективного потенциала приобретает нулевое значение для плотности дефектов  $h_{g0} = 0$  (кривая 3 на рис. 3). В этом случае считается, что канал диссипации энергии, который связан с образованием дефектных структур, не работает, а образец является монокристаллом или имеет близкую к нему структуру (CZPK). Однако, как показано на кривой 3, формирование первого максимума  $V(h_g)$  происходит в отрицательной области ( $h_g < 0$ ), что лишено физического содержания. Поэтому считаем, что при достижении нулевого значения плотность GB перестает спадать и рассматриваемая система продолжает функционировать в режиме  $h_g = 0$ .

Аналогично рассуждая, единый нулевой максимум  $V(h_g)$  (кривая 4 на рис. 3), что соответствует реализации монокристалла или CZPK, формируется в области малых деформаций В\*. Однако видно, что экстремальное значение, аналогично кривой 3, формируется при отрицательном значении плотности GB. Исходя из вышеизложенных соображений, считаем, что система из произвольного неравновесного состояния будет следовать и функционировать исключительно в режиме  $h_g = 0$ . При больших деформациях из области В возможно образование только одной предельной структуры. В то же время повышение упругих сдвиговых деформаций  $I_2$  позволяет получить предельную структуру с более мелкими размерами зёрен (SMK или НК), которая на границе  $I_2 \rightarrow \infty$  будет представлять аморфную структуру. Отметим, что подобный процесс аморфизации кристаллического NdFeB-сплава во время IPDK наблюдался в работе.

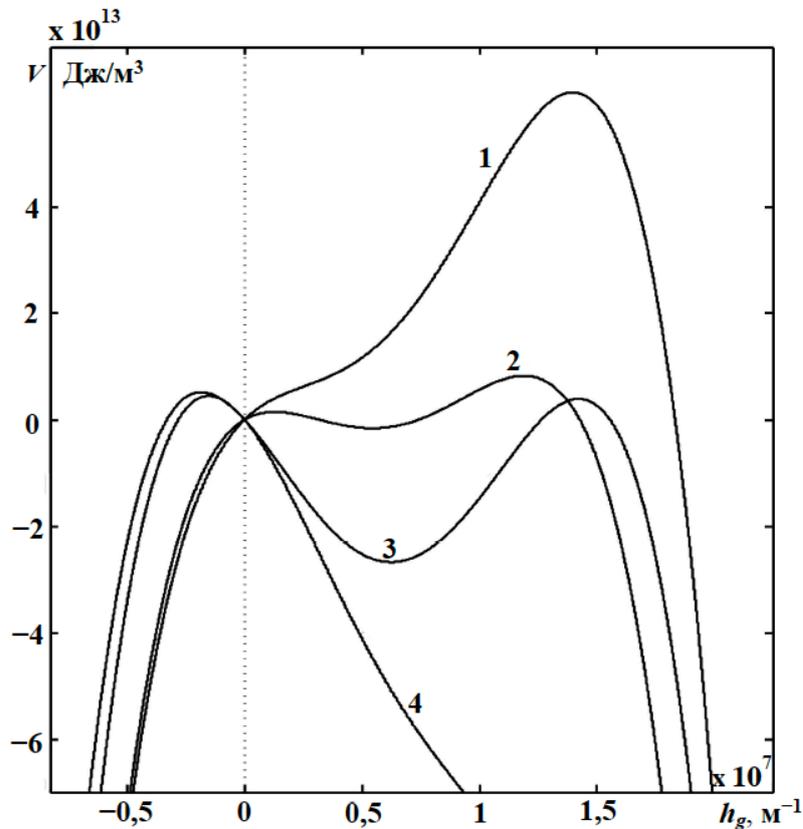


Рисунок 3. Форма эффективного потенциала  $V(h_g)$  Дж/м<sup>3</sup> (11) в зависимости от плотности GB  $h_g$  м<sup>-1</sup>. Кривые 1-4 построены для значений инвариантности  $I_2 = (5 \cdot 10^{-4}; 2,5 \cdot 10^{-4}; -10^{-4}; -10^{-3})\%$  и  $\varepsilon_{ii}^e = (-0,1; -0,05; -0,2; -0,05)\%$  (соответствующие точки 1-4 на рис. 2)

В то же время, реальному поведению материалов при IPD больше всего соответствуют кривые 1 и 2. В случае кривой 1 эволюция системы на начальной стадии протекает медленно, согласно наклону кривой внутренней энергии, а потом резко ускоряется на крутом участке кривой внутренней энергии. Последняя стадия соответствует активному режиму фрагментации материала в процессе IPD.

### Заключение

В целом получены зависимости эффективного потенциала  $V(h_g)$  (рис. 3), которые в рамках плотности GB соответствуют развитию внутренней энергии и (1) формируют множество решений относительно значений упругой деформации  $\varepsilon_{ij}^e$ . Вместе с тем эволюция двуdefектной системы в стационарных состояниях внутренней энергии, которая определяется уравнением (11) при определённых условиях (фиксированных значениях  $\varepsilon_{ii}^e$  и  $l_2$ ) и установленных параметрах теории (приведены в табл. 1), реализуется вдоль одной кривой из этого множества. Считается, что внутренняя энергия системы может характеризоваться таким поведением в том случае, когда материал с помощью IPD деформируется с равномерной скоростью, но в то же время не укрепляется; или осуществляется процесс укрепления, но скорость деформирования в процессе обработки уменьшается. В случае, когда материал укрепляется и деформируется с постоянной скоростью, эволюция кристаллической структуры для определённого этапа будет описываться различными кривыми.

Следует отметить, что переход между предельными структурами, характеризующимися разными размерами кристаллитов, может происходить непосредственно во время импульсно-поточной деформации. После прекращения обработки дефектная структура больше не эволюционирует и остаётся в состоянии, сложившемся к моменту остановки процесса, так как для дальнейшей эволюции необходимо наличие пластической деформации. Возможна локальная тепловая релаксация, но она практически не влияет на дефектную структуру. В сплавах могут происходить локальные перераспределения компонентов, в чистых металлах – точечных дефектов; система придёт в состояние теплового равновесия, однако могут реализоваться метастабильные структуры.

Скорость деформации, температура и давление являются важными факторами для получения материала с мелкодисперсной структурой. Полученные при определённых условиях размеры кристаллитов будут предельными. Таким образом, рисунок 2 даёт обобщённое представление о возможных сценариях эволюции системы при моделировании, что важно для практического применения.

### Список литературы

1. Banlusan K., Strachan A. First-principles study of elastic mechanical responses to applied deformation of metal-organic frameworks // *Journal of Chemical Physics*. 2017. 146(18). P. 2
2. Burkart M., Essig P., Liewald M., Beck M., Mueller M. Compensation of elastic die and press deformations during sheet metal forming by optimizing blank holder design. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 967. pp. 861-866.
3. Feng W., Lv, J., Hua L., Long H., Wang F. Effect of Relief-hole Diameter on Die Elastic Deformation during Cold Precision Forging of Helical Gears. In *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 207. pp. 627-632).
4. Hama T., Matsudai R., Kuchinomachi Y., Fujimoto H., Takuda H. Non-linear deformation behavior during unloading in various metal sheets. *ISIJ International*. 2015. 55(5). pp. 1067–1075.
5. Ishitsuka Y., Arikawa S., Yoneyama S. Change and anisotropy of elastic modulus in sheet metals due to plastic deformation. In *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2015. Vol. 9302. pp
6. Jeong Y., Gnäupel-Herold T., Iadicola M., Creuziger, A. Uncertainty in flow stress measurements using X-ray diffraction for sheet metals subjected to large plastic deformations // *Journal of Applied Crystallography*. 2016. 49(6), pp. 1991-2004.
7. Khayatzaheh S., Rahimi S. & Blackwell P. Effect of plastic deformation on elastic and plastic recovery in CPTitanium. *Key Engineering Materials*. 2016. pp. 716, 891-896.

8. Kurth R., Bergmann M., Tehel R., Dix M., Putz M. Cognitive clamping geometries for monitoring elastic deformation in forming machines and processes. *CIRP Annals*. 2021.
9. Li Q., Hua G., Lu H., Yu B. & Li D.Y. Understanding the Effect of Plastic Deformation on Elastic Modulus of Metals Based on a Percolation Model with Electron Work Function. 2018. *JOM*, 70(7). pp. 1130-1135.
10. Mandal A., Gupta Y.M. Elastic-plastic deformation of molybdenum single crystals shocked along // *Journal of Applied Physics*. 2017. 121(4). pp. 589-610.
11. Martino E., Santos-Cottin D., Le Mardelé F., Semeniuk K., Pizzochero M., Čerņevičs K. N., ... Akrap A. Structural Phase Transition and Bandgap Control through Mechanical Deformation in Layered Semiconductors 1T-ZrX<sub>2</sub>(X = S, Se). *ACS Materials Letters*. 2020. 2(9). pp. 1115-1120.
12. Nagasako N., Asahi R., Isheim D., Seidman D.N., Kuramoto S., Furuta T. Microscopic study of gum-metal alloys: A role of trace oxygen for dislocation-free deformation. *Acta Materialia*. 2016. pp. 105, 347-354.
13. Neto D.M., Coër J., Oliveira M.C., Alves J.L., Manach P.Y., Menezes L. F. Numerical analysis on the elastic deformation of the tools in sheet metal forming processes // *International Journal of Solids and Structures*. 2016. pp. 100–101, 270–285.
14. Odermatt A., Richert C., Huber N. Prediction of elastic-plastic deformation of nanoporous metals by FEM beam modeling: A bottom-up approach from ligaments to real microstructures. *Materials Science and Engineering A*. 2020. P. 791.
15. Shin S., Zhang C., Vecchio K.S. Phase stability dependence of deformation mode correlated mechanical properties and elastic properties in Ti-Nb gum metal. *Materials Science and Engineering A*. 2017. pp. 702, 173-183.
16. Takaki S., Masumura T., Tsuchiyama T. Elastic constants in ideal poly-crystalline metals. *Zairyo // Journal of the Society of Materials Science, Japan*. 2020. 69(9). pp. 657–660.
17. Winey J.M., Renganathan P., Gupta Y.M. Shock wave compression and release of hexagonal-close-packed metal single crystals: Inelastic deformation of c -axis magnesium // *Journal of Applied Physics*. (2015). 117(10). pp.
18. Xiong Q.-L., Li Z., Shimada T., Kitamura T. Energy storage and dissipation of elastic-plastic deformation under shock compression: Simulation and Analysis. *Mechanics of Materials*. 2021. 158.
19. Yashiro K. Deformation mode analysis by eigenvectors of atomic elastic stiffness in static uniaxial tension of various fcc, bcc, and hcp metals. *AIP Advances*. 2020. 10(3).
20. Zeng Z., Flyagina I.S., Tan J.-C. Nanomechanical behavior and interfacial deformation beyond the elastic limit in 2D metal-organic framework nanosheets. *Nanoscale Advances*. 2020. 2(11), pp. 5181-5191.

### **Systematization of the thermodynamic model of changes in the structure of metals and alloys under mechanical action**

**Patimat S. Bataeva**

Associate Professor, Department of Business Informatics

Chechen State University named after A.Kh. Kadyrov

Grozny, Russia

mguspaeva@mail.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

**Akhmed M. Gachayev**

Head of the Department of Higher and Applied Mathematics  
Chechen State University named after A.Kh. Kadyrov  
Grozny, Russia  
gachayev-chr@mail.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

**Khusein G. Chaplaev**

Associate Professor, Department of Economics and Educational Management  
Chechen State Pedagogical University  
Grozny, Russia  
mguspaeva@mail.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 03.09.2023

Accepted 14.10.2023

Published 15.12.2023

UDC 656.1/5:330.341.1

EDN FKLPSM

VAK 4.3.3. Food systems (engineering sciences)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

**Abstract**

Recently, the construction of theoretical models that allow us to qualitatively describe the accompanied processes of fragmentation (grinding) of the crystal structure of a material during processing by IPD methods has acquired significant importance. A thermodynamic model is presented that uniquely establishes the course of highly nonequilibrium processes and allows us to describe the specifics of the formation of the limiting (stationary) granular structure of the material during IPD. Defect densities, entropy, and components of the elastic strain tensor are considered as independent thermodynamic variables of the model. In the future, the presented ideas are used as a basis for solving specific problems. The purpose of the article is to generalize the thermodynamic model describing the fragmentation of metals or alloys at IPD, and to study the features and conditions of the formation of limit (stationary) structures of various types. Thus, in the approximation of a two-defect model, taking into account the dislocation density and GB, PD is constructed, which establishes the conditions for the formation of limit (stationary) structures of various types. In addition, the article examines in detail the evolution of the main structural defects and their interaction during the implementation of the stationary regime, and also establishes the dependence of the type of limit structure formed on the values of landslide deformation and the initial state of the material. It was found that the change in the states of the system has the character of SPT. It follows from the description methods that the limiting (stationary) structure is not immutable, but represents a dynamic equilibrium of the processes of generation and annihilation of structural defects.

**Keywords**

architecture, metal, durability, development, structure.

**References**

1. Banlusan K., Strachan A. Investigation of the first principles of elastic mechanical reactions to applied deformation of organometallic frameworks // *Journal of Chemical Physics*. 2017. 146(18). p. 2
2. Burkart M., Essig P., Leewald M., Beck M., Muller M. Compensation of elastic deformations of the die and press during sheet metal forming by optimizing the design of the workpiece holder. In the IOP conference series: *Materials Science and Engineering*. 2020. Volume 967. pp. 861-866.

3. Feng W., L.V., J., Hua L., Long H., Wang F. The effect of the diameter of the relief hole on the elastic deformation of the die during cold precision forging of screw gears. In the *Processia Engineering*. 2017. Volume 207. pp. 627-632).
4. Hama T., Matsudai R., Kuchinomachi Y., Fujimoto H., Takuda H. Nonlinear deformation behavior during unloading in various metal sheets. *ISIJ International*. 2015. 55(5). pp. 1067-1075.
5. Ishitsuka Yu., Arikawa S., Yoneyama S. Change and anisotropy of the modulus of elasticity in sheet metals due to plastic deformation. In the proceedings of the SPIE – International Society of Optical Engineering. 2015. Volume 9302. p.
6. Chong Yu., Gnaupel-Gerold T., Yadikola M., Kreuziger A. Uncertainty in tensile stress measurements using X-ray diffraction for sheet metals subjected to large plastic deformations // *Journal of Applied Crystallography*. 2016. 49(6), pp. 1991-2004.
7. Khayatzade S., Rahimi S. and Blackwell P. The effect of plastic deformation on the elastic and plastic recovery of titanium. *Key engineering materials*. 2016. pp. 716, 891-896.
8. Kurt R., Bergman M., Tegel R., Dix M., Putz M. Cognitive clamping geometries for monitoring elastic deformation in molding machines and processes. *Annals of CIRP*. 2021.
9. Li K., Hua G., Lu H., Yu B. And Li D.Yu. Understanding the effect of plastic deformation on the modulus of elasticity of metals based on a percolation model with the function of electron operation. 2018. *JOM*, 70 (7). pp. 1130-1135.
10. Mandal A., Gupta Y.M. Elastoplastic deformation of molybdenum single crystals upon impact along // *Journal of Applied Physics*. 2017. 121(4). pp. 589-610.
11. Martino E., Santos-Kottin D., Le Mardelet F., Semenyuk K., Pizzocero M., Chernevics K. N., ... Akrap A. Structural phase transition and band gap control by mechanical deformation in layered semiconductors 1T-ZrX<sub>2</sub>(X = S, Se). *Letters based on ACS*. 2020. 2(9). pp. 1115-1120.
12. Nagasako N., Asahi R., Ishheim D., Seidman D.N., Kuramoto S., Furuta T. Microscopic examination of gum-metal alloys: The role of trace amounts of oxygen for deformation without dislocations. *Materials of the act*. 2016. pp. 105, 347-354.
13. Neto D.M., Koher J., Oliveira M.S., Alves J.L., Manah P.Yu., Menezes L. F. Numerical analysis of elastic deformation of tools in sheet metal forming processes // *International Journal of Solids and Structures*. 2016. pp. 100-101, 270-285.
14. Odermatt A., Richert S., Huber N. Prediction of elastic-plastic deformation of nanoporous metals by FEM-beam modeling: a bottom-up approach from ligaments to real microstructures. *Materials Science and Engineering A*. 2020. P. 791.
15. Shin S., Zhang S., Vecchio K.S. Dependence of phase stability on the deformation regime correlating with the mechanical properties and elastic properties of the Ti-Nb gum. *Materials Science and Engineering A*. 2017. pp. 702, 173-183.
16. Takaki S., Masumura T., Tsuchiyama T. Elastic constants in ideal polycrystalline metals. *Zairio // Journal of the Society of Materials Science, Japan*. 2020. 69(9). pp. 657-660.
17. Winey J.M., Renganathan P., Gupta Y.M. Shock wave compression and release of single crystals of metal with hexagonal dense packing: inelastic deformation of magnesium along the c axis // *Journal of Applied Physics*. (2015). 117(10). p.
18. Xiong K.-L., Li Z., Shimada T., Kitamura T. Energy accumulation and dissipation of elastoplastic deformation under shock compression: modeling and analysis. *Mechanics of materials*. 2021. 158.
19. Yashiro K. Analysis of the deformation mode according to the eigenvectors of atomic elastic stiffness under static uniaxial tension of various hcc, bcc and gpu metals. *AIP Achievements*. 2020. 10(3).
- 20.** Zeng Z., Flyagina I.S., Tan J.-S. Nanomechanical behavior and interfacial deformation beyond the elastic limit in two-dimensional organometallic skeleton nanoliths. *Nanoscale achievements*. 2020. 2(11), pp. 5181-5191.

## **Зависимость цветовых характеристик крупки и макаронных изделий от вида пшеницы**

### **Елена Сергеевна Жиганова**

Аспирант кафедры «Технологии продуктов питания»  
Саратовский университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова  
Саратов, Россия  
Младший научный сотрудник «Лаборатории селекции и семеноводства яровой твердой пшеницы»  
Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока  
Саратов, Россия  
zhiganova@arisersar.ru  
ORCID 0000-0002-1551-0084

### **Мадина Карипулловна Садыгова**

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии продуктов питания»  
Саратовский университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова  
Саратов, Россия  
sadygova@vavilovsar.ru  
ORCID 0000-0002-9918-852X

### **Гульнара Адиятовна Бекетова**

Старший научный сотрудник «Лаборатории селекции и семеноводства яровой мягкой пшеницы»  
Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока  
Саратов, Россия  
beketova@arisersar.ru  
ORCID 0000-0001-5277-3169

### **Сергей Николаевич Сибикеев**

Доктор биологических наук, главный научный сотрудник «Лаборатории генетики и цитологии»  
Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока  
Саратов, Россия  
sibikeev@arisersar.ru  
ORCID 0000-0001-8324-9765

### **Нина Сергеевна Соловова**

Младший научный сотрудник «Лаборатории селекции и семеноводства яровой твердой пшеницы»  
Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока  
Саратов, Россия  
solovova@arisersar.ru  
ORCID 0009-0004-3784-8547

### **Никита Александрович Семилет**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии продуктов питания»  
Саратовский университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова  
Саратов, Россия  
semilet@vavilovsar.ru  
ORCID 0000-0003-4200-0896

Поступила в редакцию 01.11.2023

Принята 16.11.2023

Опубликована 15.12.2023

УДК 664.8:633.11

EDN ECBPIN

BAK 4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

### **Аннотация**

В настоящее время макаронная продукция России выходит на мировой уровень качества. Для этого нужно, чтобы сырьё, а точнее, зерно твёрдой пшеницы, соответствовало заявленным характеристикам. Одним из таких критериев является цвет крупки. Данный показатель является наследственным признаком, то есть полностью зависит от сорта. Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока уже более тридцати лет ведёт селекцию сортов яровой твёрдой пшеницы по данному показателю. В статье приведены результаты исследования крупки и готовых макаронных изделий по их цвету и содержанию каротиноидных пигментов. Для этого проводили исследование не только сортов твёрдой пшеницы, но и сортов мягкой пшеницы высокой стекловидности – как возможного дополнительного сырья макаронной продукции. В современных сортах яровой твёрдой пшеницы Тамара, Памяти Васильчука, Саратовская золотистая, Елизаветинская высокое содержание каротиноидных пигментов – от 6,60 до 7,75 мг/кг, при этом эти сорта имеют индекс цвета крупки, соответствующий требованиям макаронной отрасли – 21,9-23,9%, тогда как по индексу цвета крупки сортов яровой мягкой пшеницы Александрит на 11%, а Саратовская 70 на 53% меньше заявленных норм для макаронной отрасли. Высокие положительные корреляционные зависимости выявлены между содержанием каротиноидов и цветом крупки ( $r=0,96$ ); содержанием каротиноидов и цветностью полуфабриката ( $r=0,84$ ); цветом крупки и цветностью полуфабриката ( $r=0,90$ ). В композитных смесях твёрдой и мягкой пшеницы отмечаются уменьшение степени цветности на 6-32% и увеличение осветлённости полуфабриката на 10-20%. Минимальное уменьшение цветности в композитных смесях сорта твёрдой пшеницы Тамара с Александритом – 6%, с Саратовской 70 – 9%. Наихудший результат в смесях Саратовская золотистая и Саратовской 70 – 32%, Краснокутка – 13% и Александрит – 20%. Рекомендуются для макаронной отрасли новые сорта яровой твёрдой пшеницы Тамара, Памяти Васильчука и Елизаветинская, которые придадут устойчивый янтарно-жёлтый цвет макаронным изделиям даже в смесях с крупкой из мягкой пшеницы. При этом сорт мягкой пшеницы Александрит требует дальнейшего изучения цветовых характеристик из-за биологических особенностей.

### **Ключевые слова**

макаронные изделия, каротиноидные пигменты, яровая мягкая пшеница, яровая твёрдая пшеница.

### **Введение**

Макаронная продукция является одной из самых популярных продуктов питания у 64% российских семей по данным экспертов рынка в 2023 году (Леднева, 2023). Маркетинговые исследования показали, что одним из основных критериев выбора макарон потребителями – качество, то есть потребители отдают предпочтение более качественным изделиям: полупрозрачным, стекловидным и не разваривающимся во время приготовления. Первое, на что обращает внимание покупатель, придя в магазин, это цвет и форма макаронных изделий. (Мелешкина, 2011; Леднева, 2023)

Цвет макаронных изделий зависит от нескольких факторов, которые оказывают влияние на итоговый результат. Один из главных факторов – вид используемого сырья. Твёрдая пшеница является основным сырьём для производства муки высшего сорта специального макаронного помола (крупки), предназначенной для производства макаронных изделий высшего качества. Порядка 80% валового сбора зерна твёрдой пшеницы приходится на Алтайский край, Оренбургскую, Челябинскую, Омскую, Саратовскую, Самарскую и Волгоградскую области, однако этого недостаточно. В 2022 году Правительством РФ была внесена программа увеличения объёмов производства зерна твёрдой пшеницы отечественного производства (Алтухов, 2017; Мелешкина 2009, 2011).

Крупнейшие производители макаронной продукции, такие как Харрис СНГ (Барилла Рус), ГК СИ Групп (Шебекинские), ОАО Макфа, Омская макаронная фабрика (Добродеев) и др., предъявляют жёсткие требования к цвету крупки и содержанию каротиноидов в зерне (Леднева, 2023; Мелешкина 2013, 2016).

Каротиноидные пигменты не только придают привлекательный янтарно-желтый цвет изделиям, но и являются полезными витаминами, объединенными в одну общую группу – каротины. В зерне твёрдой пшеницы большой набор каротиноидных пигментов, однако в эндосперме самой зерновки содержится лютеин до 94%. (Васильчук, 2001; Дигесу, 2009). В крупке твёрдой пшеницы его количество доходит до 83%, в отрубях же – до 75% (Хусейн, 2015; Фу, 2017; Мальчиков 2020). Лютеин, наравне с  $\beta$ -каротином, является исходным веществом для образования витамина А. Исследованиями показано, что до 40% суточной нормы лютеина может быть удовлетворено при употреблении продукции из твёрдой пшеницы с самым высоким его содержанием. Таким образом, каротиноидные пигменты, содержащиеся в твёрдой пшенице, являются ценными для профилактического питания людей с проблемами зрения, кожными заболеваниями, а также являются ценными для питания детей с раннего возраста, что подтверждено многими испытаниями (Васильчук, 2009; Конь, 2012; Хусейн, 2015; Мальчиков, 2020).

Селекция твёрдой пшеницы ориентирована на решение проблем макаронной отрасли. Как считают Мясникова с соавторами, «концентрация каротиноидных пигментов в зерне твёрдой пшеницы определяет до 30,0% качества конечной продукции». (Мясникова, Мальчиков, 2019, с.3)

При этом цвет является наследственным показателем сорта на 80%, поэтому вот уже на протяжении более 30 лет одна из основных задач, стоящая перед селекционерами ФАНЦ Юго-Востока, – выведение сортов зерна твёрдой пшеницы с высоким содержанием каротиноидных пигментов. Одним из таких ценных селекционных материалов является сорт Саратовская золотистая, выведенная в 1993 году учёными лаборатории селекции и семеноводства яровой твёрдой пшеницы Н.С. Васильчуком, В.М. Поповой, Г.И. Шутаревой и др. (Васильчук, 2009; Гапонов, 2018)

В Италии производство паста-продуктов строго регламентируется законом. Обязательное требование – производство данного вида продуктов из зерна твёрдой пшеницы. По ГОСТ 31743-2017 РФ для группы А макаронных изделий допускается внесение мягкой пшеницы не более 15%, для групп Б и В данный показатель не нормируется. В связи с нехваткой зерна твёрдой пшеницы производители допускают добавление в рецептуру макаронных изделий 25-30% муки из мягкой пшеницы. Поэтому необходимо подобрать сырьё таким образом, чтобы качество макаронных изделий не ухудшилось. Селекционеры ФАНЦ Юго-Востока предложили для исследования следующие сорта яровой мягкой пшеницы с высокой стекловидностью: Саратовская 70, Лаборатория селекции и семеноводства яровой мягкой пшеницы (Кузьменко, Ильина, Бекетова, 2002), Александрит, Лаборатория генетики и цитологии (Сибикеев, Дружин, 2020), районированные в нашей зоне.

Целью работы является исследование влияния вида пшеницы на содержание каротиноидных пигментов в зерне, цвет крупки и макаронных изделий.

### **Материалы и методы исследования**

Итак, в данном исследовании как объекты исследования взяты: сорта местной селекции яровой твёрдой пшеницы: Гордеиформе 432, Саратовская золотистая, Луч 25, Памяти Васильчука, Тамара, Краснокутка 13 и Елизаветинская; сорта яровой мягкой пшеницы с высокой стекловидностью Саратовская 70 (стекловидность до 74%) и Александрит (стекловидность до 84%).

Исследования проводились по известным и общепринятым методикам в соответствии с нормативными документами. Материал взят за 2021-2022 годы. Шрот получали на лабораторной мельнице циклонного типа ЛМЦ-5 «Циклон» 1989 года выпуска.

Содержание каротиноидных пигментов определялось по ГОСТ Р 56576-2015. Данный ГОСТ базируется на методике определения красящих веществ книги «Методы оценки технологических качеств» 1971 года под редакцией академика ВАСХНИЛ В. Н. Ремесло. Метод основан на выделении каротиноидных пигментов из всей зерновки (шрот) экстракцией *n*-бутанолом с последующим спектрофотометрическим определением плотности раствора при длине волны 435,8 нм (Васильчук, 2001; автор, 2021). По этому же принципу определяют каротиноидные пигменты в зерне в

международных организациях : «стандартный метод 152 Международной ассоциации науки и техники о зерне (ICC) и международный официальный метод (AACC 14-50.01)» (Мальчиков, 2020).

Для выработки макаронных изделий изготавливали крупку. Зерно предварительно очищали от примесей, определяли влажность, отволаживание проводили до влажности 15% в течение 17-18 часов. Семолину получали на лабораторной мельнице Брабендер Квадрумат Юниор 1993 года производства и просеивали на ситах. Сход муки с крупяного сита 0,40 мм использовали в работе. (Васильчук, 2001)

Цвет полученной крупки определялся на спектрофотометре Spekol-10 1981 года выпуска. Метод основан на степени отражения света от белого и чёрного тела на основных трёх цветовых спектрах – красный, зеленый и синий. Для определения цвета в пшенице используют два спектра: зеленый и синий, так как различия есть только по степени основного цвета – жёлтого. Индекс желтизны крупки измеряется степенью отражения при длине волны  $\lambda=546,1$  нм и  $\lambda=435,8$  нм. Степень желтизны (b%) вычисляется по формуле, исходя из полученных значений:

$$b\% = \frac{7(Y-Z)}{\sqrt{Y}}; \quad (1)$$

Y – процент отражения крупки при  $\lambda = 546,1$  нм; Z – процент отражения семолины при  $\lambda = 435,8$  нм. (Васильчук 2001,2009)

Макаронные изделия вырабатывали в условиях лаборатории селекции и семеноводства яровой твердой пшеницы. Замес теста для изготовления спагетти осуществлялся вручную. Навеску 50 г крупки доводили до влажности 35%. Затем тесто помещали в поршень прессы ПСЛ-13 1992 года выпуска. Пресс спагеттный лабораторный разработан Н.С. Васильчуком, Е.Н. Смирновым и Ю.В. Головенко в 1992 году. Данный пресс предназначен для получения спагетти диаметром 1,8 мм. (Васильчук, 2001)

Режим сушки проходил в сушильном шкафу ТС-200 СПУ (2021 года выпуска) разогретом до температуры 40°C и относительной влажности воздуха 80%. Сушка осуществлялась 24 часа, затем выключали парогенератор и спагетти оставляли для стабилизации в шкафу на 4 часа. Спагетти заворачивали в темную бумагу, оставляли на отлежку не менее 10 суток в темном месте. Опытные варианты изделий вырабатывали с добавлением 25% крупки из зерна мягкой пшеницы.

Цвет макаронных полуфабрикатов определяли на колориметре NR 110 1998 года выпуска. Метод основан на геометрии измерений  $8/d$ , игнорируя различия в текстуре объектов и измеряет цвет независимо от других факторов. Данный метод позволяет определить цвет в цветовых характеристиках красный-зеленый (+a, -a), желтый-синий (+b, -b), и на основе данных координат высчитывается степень цветности изделия (C) и осветлённости ( $L=0-100$ ). Прибор был откалиброван со значениями цветовой гаммы  $Y = 93.13$ ,  $x = 0,3138$ ,  $y = 0,3199$ . Цвет образцов определялся путем расчета степени белизны, цветности ( $C^*$ ), общей характеристики цвета  $\Delta E$ , используя следующие уравнения (Н'Диай, 2017):

$$\Delta E^*_{ab} = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$\% \text{ of } \Delta E^*_{\max} = (\Delta E^* \times 100) / \Delta E_{\max} , \quad (3)$$

$$C^*_{ab} = ((a^*)^2 + (b^*)^2)^{1/2} , \quad (4)$$

$$h_{ab} = \tan^{-1} (b^*/a^*) , \quad (5)$$

$$\Delta H = ((\Delta E^*_{ab})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2)^{1/2} \quad (6)$$

где  $L^*$  – ось светлость (0 – чёрный, 100 – белый);  $a^*$  = красный – зелёный («+» – значения красного, «-» – значения зелёный, 0 – является нейтральным);  $b^*$  = синий – желтый («+» желтый, «-» синий, 0 является нейтральным),  $\Delta E_{\max}$  – стандартная величина ( $\Delta E_{\max} = 196,98$ ).

Величина  $\Delta E$  показывает разность стандарта и взятого образца, не указывая направление изменения (за-за L, a, b или их вариаций). В свою очередь определение угла цветового тона говорит нам об абсолютной разнице цвета, а  $\Delta H$  описывает эвклидову разницу в цвете от стандарта.

### Результаты и обсуждение

Содержание каротиноидов в зерне и, соответственно, цвет паста-продуктов, обеспечивает наследственный признак цветности сорта. Это подтверждается многолетними исследованиями Самарским НИИСХ – филиал СамНЦ РАН, ФАНЦ Юго-Востока, ФАНЦА Алтая и зарубежными центрами Канады, Италии и США (Васильчук, 2009; Мальчиков, 2020; Мясникова и др., 2019; Н'Диай, 2017; Гапонов, 2017, 2022; Кравченко, 2020; Кадушкина, 2022). Поэтому селекция сортов яровой твердой пшеницы по

данному показателю необходима при нынешних требованиях производителей и переработчиков твёрдой пшеницы.

Для получения приятной желтой окраски макаронной продукции достаточно 4-4,5 мг/кг каротиноидов в зерне (Васильчук 2001, 2009; Мальчиков, Мясникова, 2020). Даже при потерях при размоле и замесе, обесцвечивания при варке и хранении, этого количества достаточно. Но селекция ведётся на увеличение данного показателя – сейчас данный показатель у современных сортов доходит до 8,2 мг/кг (Гапонов и др. 2017, 2022).

Усредненные данные за 2021-2022 год урожая твёрдой пшеницы по содержанию каротиноидных пигментов в зерне и цвет крупки приведены в таблице 1.

Таблица 1. Содержание каротиноидных пигментов и цвет крупки мягкой и твёрдой пшеницы селекции ФАНЦ Юго-востока за 2021-2022 гг.

Наименование вида и сорта	Содержание каротиноидов, мг/кг	ИЖ, b%
Яр.мяг.пш Саратовская 70	2,80	10,4
Яр.тв.пш Краснокутка 13	4,80	17,0
Яр.тв.пш Гордеиформе 432	5,05	18,0
Яр.тв.пш Луч 25	5,95	20,5
Яр.мяг.пш Александрит	6,50	19,6
Яр.тв.пш Елизаветинская	6,60	22,7
Яр.тв.пш Саратовская золотистая	7,20	22,6
Яр.тв.пш Памяти Васильчука	7,65	21,9
Яр.тв.пш Тамара	7,75	23,9

Примечание: ИЖ – индекс желтизны. Измерение на приборе Specol-10.

Из таблицы 1 видно, что содержание каротиноидных пигментов в мягкой пшенице Саратовская 70 составляет 2,8 мг/кг, что на 30% меньше необходимой минимальной нормы для получения необходимой окраски продукта. Это обусловлено тем, что селекция на содержание желтых пигментов в зерне мягкой пшеницы не ведётся, так как для хлебопечения, как основного целевого назначения, ценится белизна муки (Мелешкина, 2014). Тогда как сорт мягкой пшеницы Александрит по содержанию каротиноидов имеет хорошие показатели – 6,5 мг/кг.

Образцы твёрдой пшеницы местной селекции имеют различный диапазон этого показателя – от минимального 4,8 до максимума 7,75 мг/кг. Особенно выделяются два сорта – Памяти Васильчука и Тамара, которые по содержанию каротиноидных пигментов превышают сорт Гордеиформе 432 на 51-53%. Сорт Гордеиформе 432 – первый сорт твердой пшеницы местной селекции – используется для сравнения и оценки эффективности селекции по всем значимым показателям качества (Васильчук, 2009).

Расчёт корреляционных показателей между содержанием каротиноидов в зерне и цветом крупки –  $r = 0,96$ . Это говорит о прямой положительной зависимости данных показателей, так как основная часть каротиноидных пигментов содержится в эндосперме зерна (Васильчук 2001; Дигесу, 2009), а лютеин имеет большую стабильность к размолу по сравнению с другими каротиноидами (Кин., 2011).

Показатель индекса цвета крупки, представленный в таблице 1, отображает данную зависимость. При приёме зерна производители макаронных изделий предъявляют требования к цвету, который должен быть не менее 22 ед.пр. Minolta (Васильчук, 2001, 2009; Мальчиков, 2020; автор, 2022). При сравнении измерений на Specol-10 и Минолта показатели коррелируют, поэтому данный метод используется при оценке селекционного материала в ФАНЦ Юго-Востока (Васильчук, 2001, 2009).

Таким образом, сорта Елизаветинская, Саратовская золотистая, Памяти Васильчука и Тамара имеют показатели, соответствующие этим требованиям – 21,9-23,9%. Наибольший показатель цветности крупки у сорта Тамара 23,9%, что подтверждает высокую ценность данного сорта по этому показателю.

На рисунке 1 показаны результаты измерения цвета готовых спагетти из исследуемых образцов в зависимости от сорта.

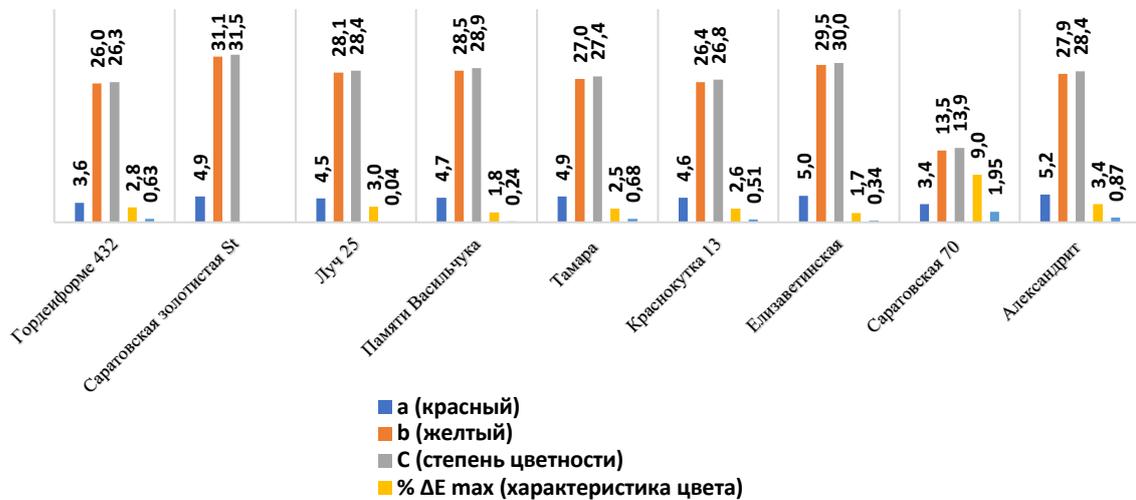


Рисунок 1. Измерения цвета на колориметре NR 110 по сортам, средние значения за 2021-2022 гг.

Сравнительная оценка цвета на колориметре и подсчёт результатов проводили по данному показателю относительно сорта стандарта Саратовская золотистая. Из данных рисунка 1 видно, что сорт-стандарт имеет высший показатель степень цветности 31,5. При этом высокие показатели так же у сортов: Елизаветинская (30,0), Памяти Васильчука (28,9), Луч 25 и Александрит (по 28,4) и Тамара (27,4). Самый низкий показатель у сорта Саратовская 70 – 13,9. По корреляционной зависимости между содержанием каротиноидных пигментов и цветностью спагетти зависимость положительная –  $r = 0,84$ , а между цветом крупки и цветностью спагетти –  $r = 0,90$ .

Наименьшее отклонение общего показателя цвета относительно стандарта менее 2% у сортов: Елизаветинская и Памяти Васильчука, до 3% – у сортов Тамара и Краснокутка 13. Высокое отклонение по цвету от стандарта показал сорт яровой мягкой пшеницы Саратовская 70 -9%. Также данный образец имеет наименьший угол цветового тона, тем самым эвклидова разница  $\Delta H$  увеличивается, что отразилось и при его смешивании с крупкой твёрдой пшеницы на качестве спагетти (табл. 2). У всех остальных образцов данный показатель до единицы, наименьший показатель у сортов Луч 25, Памяти Васильчука и Елизаветинская.

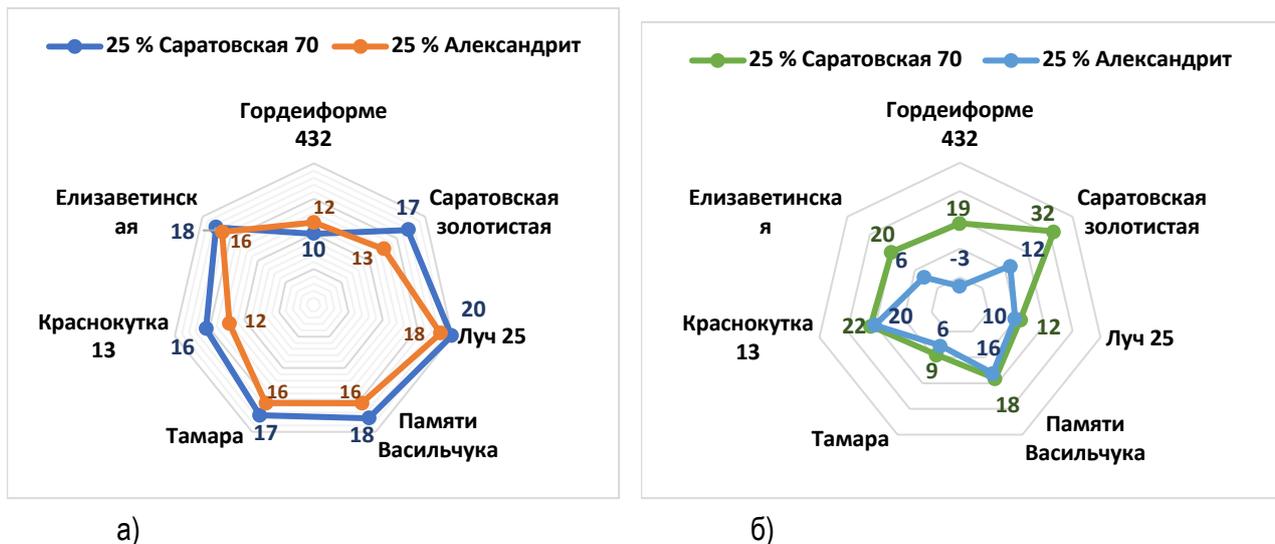
Таблица 2. Показатели степени цветности за 2021-2022 гг. по сортам яровой твёрдой пшеницы, и по ним же – с добавлением мягкой яровой пшеницы Саратовская 70 и Александрит

Наименование вида и сорта	C*	C	
		+25% яр.мяг.пш Саратовская70	+25% яр.мяг.пш Александрит
Яр. мяг. пш Саратовская 70	13,92	-	-
Яр. тв. пш Гордеиформе 432	26,29	21,34	27,10
Яр. тв. пш Краснокутка 13	26,78	20,94	21,36
Яр. тв. пш Тамара	27,39	24,92	25,88
Яр. мяг. пш Александрит	28,39	-	-
Яр. тв. пш Луч 25	28,44	25,14	25,70
Яр. тв. пш Памяти Васильчука	28,90	23,64	24,23
Яр. тв. пш Елизаветинская	29,96	23,89	28,17
Яр. тв. пш Саратовская золотистая	31,51	21,53	27,61

\*Примечание: C – степень цветности.

При анализе данных таблицы 2 видно, что при исследовании образцов спагетти из композитной смеси твёрдой пшеницы с добавлением 25% мягкой пшеницы наблюдается уменьшение степени цветности. Соответственно, наблюдается увеличение осветленности полуфабриката (рис. 2а). Отмечается, что при добавлении крупки из сорта Саратовской 70 наименьшая цветность у образцов спагетти с сортом твёрдой пшеницы Краснокутка 13 – 20,94 ед.п. Хорошие результаты у образцов с композитной смесью с сортами твёрдой пшеницы Луч 25, Тамара и Елизаветинская.

Стоит отметить, что в композитных смесях с сортом мягкой пшеницы Александрит и сортами твёрдой пшеницы Елизаветинская, Саратовская золотистая, Тамара и Луч 25 наблюдается высокая степень цветности. Даже при смешивании с сортом Гордеиформе 432 повышается степень цветности на 3%, тогда как при смешивании с сортом Краснокутка 13 самый низкий показатель – 21,36 ед.пр.



а) процент увеличения осветленности (L) с внесением яровой мягкой пшеницы Саратовская 70 и Александрит в количестве 25% к сортам яровой твердой пшеницы; б) процент уменьшения степени цвета (C) с внесением яровой мягкой пшеницы Саратовская 70 и Александрит в количестве 25% к сортам яровой твёрдой пшеницы

Из данных рисунка 2 б видно, что наибольшее изменение цвета в композитной смеси из сорта твердой пшеницы Саратовская золотистая и мягкой пшеницы Саратовская 70 – 32%. Сорт Краснокутка 13 в композитных смесях с сортами исследуемых мягких пшениц уменьшил цветность на 20-22 %. И только в композитных смесях с сортом твердой пшеницы Тамара незначительные изменения в цветности, при этом цвет спагетти уменьшился на 6-9%, что подтверждает высокую смесительную способность этого сорта по стабильности цвета.

### Заключение

В результате проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Достижения Саратовской селекции по содержанию каротиноидных пигментов в зерне твёрдой пшеницы доказывают высокое качество сырья. В современных сортах яровой твёрдой пшеницы Тамара, Памяти Васильчука, Саратовская золотистая, Елизаветинская содержание каротиноидных пигментов от 6,60 до 7,75 мг/кг. Соответственно, эти же сорта имеют индекс цвета крупки, соответствующий требованиям макаронной отрасли, – 21,9-23,9%, тогда как по индексу цвета крупки сортов яровой мягкой пшеницы Александрит – на 11%, а Саратовская 70 – на 53% меньше заявленных норм для макаронной отрасли.

2. Высокие положительные корреляционные зависимости: между содержанием каротиноидов и цветом крупки ( $r=0,96$ ); содержанием каротиноидов и цветностью полуфабриката ( $r=0,84$ ); цветом крупки и цветностью полуфабриката ( $r=0,90$ ).

3. Высокую степень цветности полуфабрикатов имеют сорта твёрдой пшеницы Елизаветинская (30,0), Памяти Васильчука (28,9), Луч 25, Тамара (27,4) и сорт мягкой пшеницы Александрит (28,4), что может быть связано с красnozерностью данного сырья, так как цветовые характеристики высокие в красном диапазоне  $\alpha^*$ , низкий показатель, соответственно, у сорта мягкой пшеницы Саратовская 70 – 13,9.

4. Наименьшее отклонение по цвету  $\% \Delta E_{\max}$  до 2% имеют сорта твёрдой пшеницы Елизаветинская (1,7%) и Памяти Васильчука (1,8%), до 3% сорта Тамара (2,5%) и Краснокутка 13 (2,6%), наибольшее отклонение цвета у сорта мягкой пшеницы Саратовская 70 (9%). Эвклидова разница  $\Delta N$  у всех образцов до 1, кроме Саратовская 70 (1,95), наименьший показатель у сортов Луч 25 (0,04), Памяти Васильчука (0,024) и Елизаветинская (0,34).

5. В композитных смесях твёрдой и мягкой пшеницы отмечаются уменьшение степени цветности на 6-32% и увеличение осветлённости полуфабриката на 10-20%. Минимальное уменьшение цветности в композитных смесях сорта твёрдой пшеницы Тамара с Александритом – 6%, с Саратовской 70 – 9%. Наихудший результат в смесях Саратовская золотистая и Саратовской 70 – 32%, Краснокутка 13 и Александрит – 20%.

6. Исходя из результатов исследования, можно рекомендовать для макаронной отрасли новые сорта яровой твёрдой пшеницы Тамара, Памяти Васильчука и Елизаветинская, что позволит придать устойчивый янтарно-жёлтый цвет макаронным изделиям даже в смесях с крупкой из мягкой пшеницы. При этом сорт мягкой пшеницы Александрит требует дальнейшего изучения цветовых характеристик из-за биологических особенностей.

#### Список литературы

1. Алтухов А.И. Производству высококачественной пшеницы необходима государственная поддержка // Зернобобовые и крупяные культуры. 2017. №3 (23). С. 9.
2. Васильчук Н.С. Селекция яровой твердой пшеницы. Саратов, 2001. 123 с.
3. Васильчук Н.С., Гапонов С.Н., Еременко Л.В. Селекция твёрдой яровой пшеницы на высокое содержание каротиноидов в зерне // Сборник научных трудов. Саратов: ООО «Ракурс», 2009. С. 89-100.
4. Гапонов С.Н., Попова В.М., Шутарева Г.И., Еременко Л.В., Цетва Н.М., Паршикова Т.М. Основные достижения и направления селекции яровой твердой пшеницы в Федеральном аграрном научном центре Юго-Востока // Зерновое хозяйство России. 2017. № (4). С. 17-21.
5. Гапонов С.Н., Попова В.М., Шутарева Г.М., Цетва Н.М., Паршикова Т.М., Щукин С.А. 25 лет сорту Саратовская золотистая // Зерновое хозяйство России. 2018. № (5). С. 57-60.
6. Гапонов С.Н., Шутарева Г.И., Цетва Н.М., Цетва И.С., Милованов И.В., Бурмистров Н.А., Жиганова Е.С., Куликова В.А. Новый сорт яровой твердой пшеницы Тамара – источник каротиноидных пигментов // Зерновое хозяйство России. 2022. № (3). С. 51-56.
7. Дигесу А.М., Платани К., Каттивелли Л., Манджини Г., Бланко А. Генетическая изменчивость компонентов желтого пигмента у культурных и диких тетраплоидных пшениц // Журнал Cereal Science. 2009. № 50 (2). С. 210-218.
8. Жиганова Е.С., Садыгова М.К., Соловова Н.С. Сравнительный анализ содержания каротиноидов в зерне твердой пшеницы Саратовской селекции // Состояние и пути развития производства и переработки продукции животноводства, охотничьего и рыбного хозяйства: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию технологического факультета Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова, Улан-Удэ, 24-26 июня 2022 года. Улан-Удэ: Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова, 2022. С. 22-28.
9. Кадушкина В.П., Грабовец А.И., Коваленко С.А. Роль генофонда при селекции яровой твёрдой пшеницы в условиях нарастания аридности климата // Рисоводство. 2022. № 3(56). С. 41-47.
10. Конь И.Я. Современные представления о роли каротиноида лютеина в питании детей раннего возраста // Педиатрия. Журнал им. Г.Н. Сперанского. 2012. №1. С. 7.

11. Кин Э.Г., Борденаве Н., Эджета Г., Хамакер Б.Р., Ферруцци М.Г. Биодоступность каротиноидов из цельнозерновой каши из сорго с декортикированным желтым эндоспермом // Журнал Cereal Science. 2011. № 54 (3). С. 450-459.
12. Кравченко Н.С., Самофалова Н.Е., Олдырева И.М., Макарова Т.С. Характеристика сортов озимой твердой пшеницы по качеству зерна и макаронным свойствам // Зерновое хозяйство России. 2020. № (3). С. 26-31.
13. Леднева О.В., Цыпин А.П., Гаджимирзоев Г.И. Статистический анализ состояния и перспектив развития российского рынка макаронных изделий // АПК: экономика, управление. 2023. № 4. С. 41-49.
14. Мальчиков П.Н., Мясникова М.Г. Содержание жёлтых пигментов в зерне твёрдой пшеницы (*Triticum durum* Desf.): биосинтез, генетический контроль, маркерная селекция // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020. № 24(5). С. 501-511.
15. Мелешкина Е.П. Современные аспекты качества зерна пшеницы // Аграрный вестник Юго-Востока. 2009. № 3(3). С. 4-7.
16. Мелешкина Е. Нужно ли нам качество зерна? // Хлебопродукты. 2011. № 6. С. 12-16.
17. Мелешкина Е.П., Коломиец С.Н., Шеленкова Л.В., Коваль А.И. Целевое использование зерна и муки – требование времени // Пищевая промышленность. 2013. №9. С. 3.
18. Мелешкина Е.П. О новых подходах к качеству пшеничной муки // Контроль качества продукции. 2016. № 11. С. 13-18.
19. Мясникова М.Г., Мальчиков П.Н., Шаболкина Е.Н., Анисимкина Н.В., Розова М.А., Чახеева Т.В. Результаты селекции твердой пшеницы в России на содержание каротиноидных пигментов в зерне // Зерновое хозяйство России. 2019. № (6). С. 37-40.
20. Н'Диай А., Хейл Дж.К., Кори А.Т., Кларк Ф.Р., Кларк Дж.М., Нокс Р.Э. Анализ ассоциаций цвета манной крупы и макаронных изделий на основе одного маркера и гаплотипов в селекционных линиях элитной твёрдой пшеницы с использованием консенсусной карты высокой плотности // PLoS ONE. 2017. № 12(1). pp.170-941.
21. Садыгова М.К., Гапонов С.Н., Шутарева Г.И., Филина Д.К. Технологический потенциал зерна яровой твердой пшеницы Саратовской селекции // Техника и технология пищевых производств. 2021. № 51(4). С. 759-767.
22. Самофалова Н.Е., Иличкина Н.П., Безуглая Т.С., Кравченко Н.С., Иванисова А.С., Кабанова Н.В., Дубинина О.А. Сопряженность признаков качества зерна, крупки и макарон у пшеницы твердой озимой // Зерновое хозяйство России. 2022. № (4). С. 62-69.
23. Ремесло В.Н. Методы оценки технологических качеств зерна. Ред. коллегия: акад. ВАСХНИЛ В.Н. Ремесло; Всесоюз. акад. с.-х. наук им. В.И. Ленина. Науч. совет по качеству зерна. Москва: 1971. 136 с.
24. Фу Б.Х., Чиремба К., Позняк С.Дж., Ван К., Нам С. Суммарное содержание фенольных и желтых пигментов и антиоксидантная активность мукомольных фракций твердой пшеницы // Антиоксиданты. 2017. № 6 (4).
25. Хуссейн А., Ларссон Х., Куктайте Р., Олссон М.Е., Йоханссон Э. Содержание каротиноидов в органически произведённой пшенице: значение для здоровья человека при потреблении // Международное общественное здравоохранение в области окружающей среды. 2015. №12 (11). С. 68-83.

## Dependence of the color characteristics of cereals and pasta on the type of wheat

### **Elena S. Zhiganova**

Postgraduate student at the Department of Food Technologies  
Saratov University of Genetics, Biotechnology and Engineering. N.I. Vavilova  
Saratov, Russia  
Junior Researcher, Laboratory of Breeding and Seed Production of Spring Durum Wheat  
Federal Agrarian Research Center of the South-East  
Saratov, Russia  
zhiganova@arisersar.ru  
ORCID 0000-0002-1551-0084

### **Madina K. Sadigova**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Technologies  
Saratov University of Genetics, Biotechnology and Engineering. N.I. Vavilova  
Saratov, Russia  
sadygova@vavilovsar.ru  
ORCID 0000-0002-9918-852X

### **Gulnara A. Beketova**

Senior Researcher at the Laboratory of Breeding and Seed Production of Spring Soft Wheat  
Federal Agrarian Research Center of the South-East  
Saratov, Russia  
beketova@arisersar.ru  
ORCID 0000-0001-5277-3169

### **Sergey N. Sibikeev**

Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Genetics and Cytology  
Federal Agrarian Research Center of the South-East  
Saratov, Russia  
sibikeev@arisersar.ru  
ORCID 0000-0001-8324-9765

### **Nina S. Solovova**

Junior Researcher, Laboratory of Breeding and Seed Production of Spring Durum Wheat  
Federal Agrarian Research Center of the South-East  
Saratov, Russia  
solovova@arisersar.ru  
ORCID 0009-0004-3784-8547

### **Nikita A. Semilet**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technologies  
Saratov University of Genetics, Biotechnology and Engineering. N.I. Vavilova  
Saratov, Russia  
semilet@vavilovsar.ru  
ORCID 0000-0003-4200-0896

Received 01.10.2023

Accepted 16.11.2023

Published 15.12.2023

UDC 664.8:633.11  
EDN ECBPIN  
VAK 4.3.3. Food systems (engineering sciences)  
OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

### Abstract

Currently, Russian pasta products are reaching the world level of quality. To do this, it is necessary that the raw materials, or rather durum wheat grain, meet the declared characteristics. One of these criteria is the color of the grain. This indicator is a hereditary trait, i.e. completely depends on the variety. The Federal Agrarian Research Center of the South-East has been selecting varieties of spring durum wheat for this indicator for more than thirty years. The article presents the results of a study of grains and finished pasta based on their color and content of carotenoid pigments. For this purpose, a study was carried out not only on durum wheat varieties, but also on high-vitreous soft wheat varieties, as a possible additional raw material for pasta products. Modern varieties of spring durum wheat Tamara, Pamyati Vasilchuka, Saratovskaya Zolotistaya, Elizavetinskaya have a high content of carotenoid pigments from 6.60 to 7.75 mg/kg, while they have a grain color index that meets the requirements of the pasta industry of 21.9-23.9%, whereas according to the grain color index of the spring soft wheat varieties Alexandrit is 11%, and Saratovskaya 70 is 53% less than the declared standards for the pasta industry. High positive correlations: between the content of carotenoids and the color of the grain ( $r=0.96$ ); content of carotenoids and color of the semi-finished product ( $r=0.84$ ); the color of the grain and the color of the semi-finished product ( $r = 0.90$ ). In composite mixtures of durum and soft wheat, a decrease in the degree of color by 6-32% and an increase in the lightness of the semi-finished product by 10-20% are noted. The minimum reduction in color in composite mixtures of the durum wheat variety Tamara with Alexandrite is 6%, with Saratovskaya 70-9%. The worst result is in the mixtures Saratov Golden and Saratov 70-32%, Krasnokutka 13 and Alexandrite – 20%. New varieties of spring durum wheat Tamara, Pamyati Vasilchuka and Elizavetinskaya are recommended for the pasta industry, which will give a stable amber-yellow color to pasta even in mixtures with soft wheat semolina. At the same time, the bread wheat variety Alexandrit requires further study of color characteristics due to biological characteristics.

### Keywords

pasta, carotenoid pigments, spring soft wheat, spring durum wheat.

### References

1. Altukhov A.I. State support is needed for the production of high-quality wheat // Legumes and cereals. 2017. No. 3 (23). p. 9.
2. Vasilchuk N.S. Breeding of spring durum wheat. Saratov, 2001. 123 p.
3. Vasilchuk N.S., Gaponov S.N., Eremenko L.V. Selection of durum spring wheat for high carotenoid content in grain // Collection of scientific papers. Saratov: LLC «Rakurs», 2009. pp. 89-100.
4. Gaponov S.N., Popova V.M., Shutareva G.I., Eremenko L.V., Cetva N.M., Parshikova T.M. The main achievements and directions of spring durum wheat breeding in the Federal Agrarian Scientific Center of the South-East // Grain farming in Russia. 2017. No. (4). pp. 17-21.
5. Gaponov S.N., Popova V.M., Shutareva G.M., Cetva N.M., Parshikova T.M., Shchukin S.A. 25 years of the Saratov golden variety // Grain farming of Russia. 2018. No. (5). pp. 57-60.
6. Gaponov S.N., Shutareva G.I., Cetva N.M., Cetva I.S., Milovanov I.V., Burmistrov N.A., Zhiganova E.S., Kulikova V.A. A new variety of spring durum wheat Tamara – a source of carotenoid pigments // Grain farming of Russia. 2022. No. (3). pp. 51-56.
7. Digesu A.M., Platani K., Cattivelli L., Mangini G., Blanco A. Genetic variability of yellow pigment components in cultivated and wild tetraploid wheat // Journal of Cereal Science. 2009. No. 50 (2). pp. 210-218.
8. Zhiganova E.S., Sadygova M.K., Solovova N.S. Comparative analysis of carotenoid content in durum wheat grain of Saratov breeding // State and ways of development of production and processing of livestock products, hunting and fisheries: Materials of the international scientific and practical conference

dedicated to the 90th anniversary of the Technological Faculty of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, Ulan-Ude, June 24-26, 2022. Ulan-Ude: Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, 2022. pp. 22-28.

9. Kadushkina V.P., Grabovets A.I., Kovalenko S.A. The role of the gene pool in the breeding of spring durum wheat in conditions of increasing climate aridity // *Rice farming*. 2022. No. 3(56). pp. 41-47. DOI 10.33775/1684-2464-2022-56-3-41-47.
10. Kon I.Ya. Modern ideas about the role of lutein carotenoid in the nutrition of young children // *Pediatrics*. The magazine named after G.N. Speransky. 2012. No. 1. p. 7.
11. Kin E.G., Bordenave N., Ejeta G., Hamaker B.R., Ferruzzi M.G. Bioavailability of carotenoids from whole grain porridge from sorghum with decorticated yellow endosperm // *Journal of Cereal Science*. 2011. No. 54 (3). pp. 450-459.
12. Kravchenko N.S., Samofalova N.E., Oldyreva I.M., Makarova T.S. Characteristics of winter durum wheat varieties by grain quality and pasta properties // *Grain farming of Russia*. 2020. No. (3). pp. 26-31.
13. Ledneva O.V., Tsylin A.P., Gadzhimirzoev G.I. Statistical analysis of the state and prospects of development of the Russian pasta market // *Agroindustrial complex: economics, management*. 2023. No. 4. pp. 41-49. DOI 10.33305/234-41.
14. Boys P.N., Myasnikova M.G. The content of yellow pigments in durum wheat grain (*Triticum durum* Desf.): biosynthesis, genetic control, marker selection // *Vavilovsky Journal of Genetics and Breeding*. 2020. No. 24(5). pp. 501-511.
15. Meleshkina E.P. Modern aspects of wheat grain quality // *Agrarian bulletin of the South-East*. 2009. No. 3(3). pp. 4-7.
16. Meleshkina E. Do we need grain quality? // *Bread products*. 2011. No. 6. pp. 12-16.
17. Meleshkina E.P., Kolomiets S.N., Shelenkova L.V., Koval A.I. The targeted use of grain and flour is a requirement of time // *Food industry*. 2013. No. 9. p. 3.
18. Meleshkina E.P. About new approaches to the quality of wheat flour // *Product quality control*. 2016. No. 11. pp. 13-18.
19. Myasnikova M.G., Malikov P.N., Shabolkina E.N., Anisimkina N.V., Rozova M.A., Chakheeva T.V. Results of durum wheat breeding in Russia for the content of carotenoid pigments in grain // *Grain farming of Russia*. 2019. No. (6). pp. 37-40.
20. N'Diaye A., Hale J.K., Corey A.T., Clark F.R., Clark J.M., Knox R.E. Analysis of semolina and pasta color associations based on a single marker and haplotypes in breeding lines of elite durum wheat with using a high-density consensus map // *PLoS ONE*. 2017. No. 12(1). e0170941.
21. Sadygova M.K., Gaponov S.N., Shutareva G.I., Filina D.K. Technological potential of spring durum wheat grain of Saratov breeding // *Technique and technology of food production*. 2021. No. 51(4). pp. 759-767.
22. Samofalova N.E., Ilichkina N.P., Bezuglaya T.S., Kravchenko N.S., Ivanisova A.S., Kabanova N.V., Dubinina O.A. Conjugation of signs of grain quality, grits and pasta in winter durum wheat // *Grain farming of Russia*. 2022. No. (4). pp. 62-69.
23. Craft V.N. Methods of assessing the technological qualities of grain. Editorial board: akad. VASHNIL V.N. Craft; All-Union. Academy of Agricultural Sciences named after V.I. Lenin. Scientific. grain Quality Council. Moscow: 1971. 136 p.
24. Fu B.H., Chiremba K., Poznyak S.J., Wang K., Nam S. The total content of phenolic and yellow pigments and the antioxidant activity of durum wheat flour fractions // *Antioxidants*. 2017. № 6 (4).
25. Hussein A., Larsson H., Kuktaite R., Olsson M.E., Johansson E. Carotenoid content in organically produced wheat: importance for human health in consumption // *International public health in the field of the environment*. 2015. No.12 (11). pp. 14068-83.

**Продуктивность и хлебопекарное качество зерна сортов и линий озимой мягкой пшеницы  
селекции «ФИЦ «Немчиновка»**

**Баграт Исменович Сандухадзе**

Доктор сельскохозяйственных наук, академик Российской академии наук  
Федеральный Исследовательский Центр «Немчиновка»  
Москва, Россия  
sandukhade@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0000-0001-7184-7645

**Михаил Александрович Кузьмич**

Доктор сельскохозяйственных наук  
Федеральный Исследовательский Центр «Немчиновка»  
Москва, Россия  
kuzmich@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

**Рамин Закирович Мамедов**

Кандидат сельскохозяйственных наук  
Федеральный Исследовательский Центр «Немчиновка»  
Москва, Россия  
mamedov@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0000-0003-2473-4538

**Мария Сергеевна Крахмалёва**

Кандидат сельскохозяйственных наук  
Федеральный Исследовательский Центр «Немчиновка»  
Москва, Россия  
krahmaleva@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0000-0002-0861-1514

**Валентина Васильевна Бугрова**

Старший научный сотрудник  
Федеральный Исследовательский Центр «Немчиновка»  
Москва, Россия  
bugrova@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0009-0001-5730-7826

**Ярослав Станиславович Молодовский**

Старший научный сотрудник  
Федеральный Исследовательский Центр «Немчиновка»  
Москва, Россия  
molodovski@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0009-0004-0314-5245

Поступила в редакцию 14.06.2023

Принята 22.11.2023

Опубликована 15.12.2023

УДК 633.11:664.64(470.41/.45)  
EDN FTPAFT  
BAK 4.3.3. Пищевые системы (технические науки)  
OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

### **Аннотация**

Проблема производства зерна пшеницы высших классов является актуальной для условий всего мира, в частности России. Селекция играет важную роль в решении этой задачи, так как современные сорта различаются не только по урожайности, но и по качественным характеристикам. Для условий центрального региона РФ производство собственного хлебопекарного зерна было достигнуто внедрением сортов озимой мягкой пшеницы селекции ФГБНУ «ФИЦ «Немчиновка». В работе рассматривали 4 сорта (Московская 39, Московская 56, Немчиновская 57, Немчиновская 85) и 1 линию озимой мягкой пшеницы – Московская 42 – по данным 2021-2022 годов. Показано, что наиболее урожайным среди испытуемых был сорт Немчиновская 57 – 6,19 т/га и 8,64 т/га соответственно. На показатели качества, как и на урожайность, значительное влияние имели условия года. В 2022 году погодные условия способствовали формированию хорошего качества зерна. Среди изученных номеров можно отметить сорт Московская 39, имеющий содержание клейковины в муке 34,7%, – объёмный выход хлеба 947 см<sup>3</sup> за годы исследования. В целом все изученные сорта и линии соответствуют по своим показателям сильным и ценным пшеницам и могут быть рекомендованы для производства хлебопекарного зерна.

### **Ключевые слова**

урожайность озимой пшеницы, качество зерна и муки, реология теста, лабораторная выпечка хлеба.

### **Введение**

Производство зерна пшеницы высших классов в нашей стране, за последние 15 лет, имеет устойчивый тренд к снижению. В текущем году, при очередном рекорде валового сбора пшеницы в 99 млн тонн, доля зерна 3-го класса не превышает 23 млн тонн. Однако именно из этого класса вырабатывают муку высшего сорта, используемую для производства высококачественного хлеба. По экспертной оценке, ежегодная потребность в таком зерне достигает 18 млн тонн. (Кузьмич, 2023). Такое же зерно наиболее востребовано и для экспорта за рубеж. 1-й и 2-й классы зерна, отнесённые к сильному по качеству, в ассортименте производимого зерна отсутствуют. Из-за этого 4-й класс продовольственной пшеницы улучшать нечем. Низкая маржинальность мукомольного производства и выпечки хлеба приводит к тому, иногда муку пшеничную хлебопекарную, соответствующую требованиям ГОСТ Р 52189-03, заменяют мукой пшеничной общего назначения, соответствующей ТУ 8 РФ 11-95-91, с меньшим количеством сырой клейковины, что приводит к выработке изделий с низкими показателями качества (Мелешкин, 2018). В таких условиях проведение исследований, направленных на увеличение продуктивности пшеницы и производства высококачественного зерна, являются актуальными.

Главная причина исчезновения высококлассного сильного зерна известна – низкий уровень применения азотных удобрений на фоне снижающихся параметров плодородия почв (Кузьмич, Сандухадзе, 2020). Рост урожайности пшеницы усилил дефицит азота в питании растений. В связи с этим селекция пшеницы не только на высокую урожайность, но и на качество получаемого урожая является актуальной.

В Росреестр селекционных достижений на 2023 год включено 404 сорта озимой мягкой пшеницы, в том числе 88 сильных и 189 ценных (gosreestr.ru). Сорта озимой пшеницы Немчиновской селекции отличаются своими качественными характеристиками, большинство являются сильными или ценными. Многими авторами высокое качество сортов Немчиновской селекции подтверждалось неоднократно, что особенно важно не только для производства и получения хлебопекарной пшеницы, но и для

использования в качестве исходного материала в селекционном процессе (Пахотина, 2019; Пахотина, Кашуба, Игнатъева, Трипутин, 2020; Сандухадзе, Мамедов, Крахмалёва, Бугрова, 2021).

Целью данного исследования являлось изучение зависимости между урожайностью сортов озимой пшеницы селекции ФИЦ «Немчиновка»: Московская 39, Московская 56, Немчиновская 57, Немчиновская 85 и линии Московская 42 и показателями качества зерна и муки.

### Материалы и методы исследования

В работе рассматриваются урожайность, показатели качества муки и реологические свойства теста, а также результаты стандартной лабораторной выпечки хлеба из сортов и линий озимой мягкой пшеницы селекции «ФИЦ «Немчиновка». Выбранные сорта отличаются по своим характеристикам (табл. 1). Сорт Московская 39 – сильная пшеница, Московская 56 – ценная, Немчиновская 57 – филлер, Немчиновская 85 – сильная, сорт Московская 42 был в 2023 году передан на Государственное сортоиспытание.

Таблица 1. Сорта и линии озимой мягкой пшеницы селекции ФИЦ «Немчиновка»

Сорт	Год районирования	Регионы допуска	Направление использования
Московская 39	1999	2, 3, 4, 5, 7, 9, 12	Сильная
Московская 56	2008	3, 4, 5	Ценная
Немчиновская 57	2009	3, 5	–
Немчиновская 85	2021	3, 4, 5	Сильная
Московская 42	Передан на ГСУ в 2023 г.	–	–

Полевые опыты были заложены на полях селекционного севооборота в соответствии с «Методикой Государственного сортоиспытания» (Министерство сельского хозяйства РФ, 2019). Почва дерново-подзолистая, суглинистая. Агротехнические показатели следующие: содержание гумуса (ГОСТ 26213-91) – 2,1...2,5%, рН солевой вытяжки в слое 0-20 см – 5,4, гидролитическая кислотность – 2,51 мг-экв. на 100 г. Содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (по Кирсанову) – 237 мг/кг, K<sub>2</sub>O – (по Масловой) 134 мг/кг. Мощность пахотного слоя – 28 см. Агротехника возделывания озимой пшеницы в опыте – общепринятая для зоны. Предшественником озимой пшеницы служил чистый пар. Минеральные удобрения вносили под предпосевную культивацию из расчёта N<sub>24</sub> P<sub>60</sub> K<sub>60</sub> (аммофоска). Весеннюю подкормку проводили аммиачной селитрой в дозе 35 кг действующего вещества на 1 га. Помол зерна с 70% выходом муки выполнили на автоматической лабораторной мельнице МСКА (Бюллер). Хлебопекарную оценку проводили методом пробной лабораторной выпечки из 100 г муки в двух повторениях по Методике Государственного сортоиспытания (Министерство сельского хозяйства РФ, 1988). Внешний вид и состояние мякиша выпечки оценивали по пятибалльной шкале.

### Результаты и обсуждение

Продуктивность и качество зерна изучаемых сортов и линий в годы исследований заметно различались (рис. 1). Погодные условия в 2021 году были малоблагоприятными. Перезимовка растений была удовлетворительной, однако малое количество осадков в период налива зерна способствовал формированию щуплого зерна. Средний урожай по опыту составил 5,84 т/га. Лучшие результаты были получены у сорта Немчиновская 57 и линии Московская 42. Наименьшая урожайность получена у сорта Московская 56 – 5,01 т/га. Разница в размерах урожая между остальными сортами находилась в пределах НСР<sub>05</sub> = 0,40.

Условия 2022 года были более благоприятными для роста и развития растений. Урожайность в среднем по опыту увеличилась до 7,62 т/га. Наиболее высокий урожай был получен у сорта Немчиновская 57 – 8,64 т/га. Этот же сорт продемонстрировал наибольшую продуктивность в среднем за 2 года исследований.

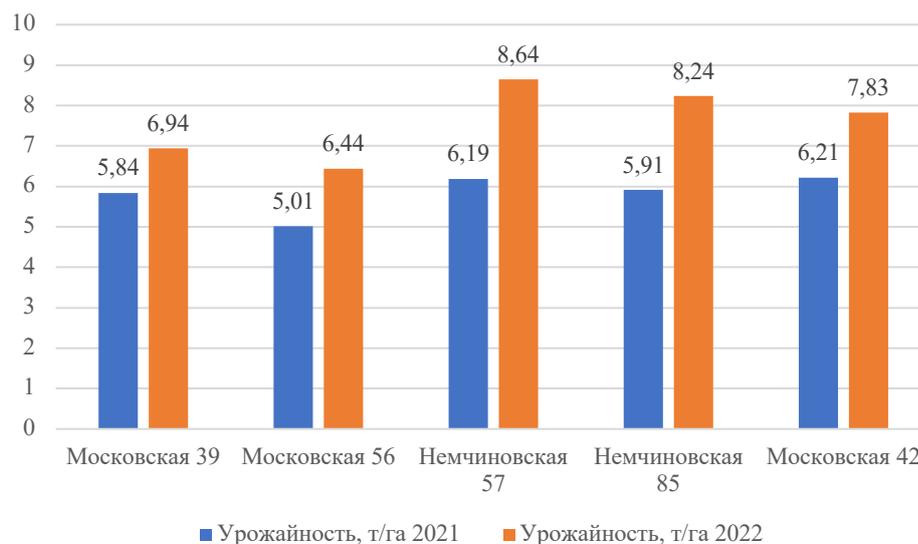


Рисунок 1. Урожайность сортов, 2021-2023 гг. 2021 г. НСР<sub>05</sub>=0,40, 2022 г. НСР<sub>05</sub> = 0,25.

Качество зерна определяли по нескольким показателям. Первым и самым доступным способом определения качества зерна является стекловидность. Как правило, высокостекловидное зерно накапливает больше белка и клейковины. При нормативном показателе 60% для сильного зерна в первый год такое зерно получено только у сорта Московская 39 (табл. 2). На следующий год практически все сорта имели высокую стекловидность.

Количество клейковины в муке у всех образцов превосходило ограничительный уровень в 30%, что дает основание отнести все образцы к сильным пшеницам. Качество клейковины, определяемое по индексу деформации (ИДК) находилось в пределах 58-80 единиц, что соответствует сильной муке (улучшитель) по требованиям, предъявляемым к пшенице хлебопекарной по ГОСТ 34702-2020.

Результаты определения удельной работы деформации теста на альвеолабе, показали, что неблагоприятные погодные условия 2021 года значительно ухудшили качество муки в целом (табл. 2). Несмотря на это, мука из пшениц Московская 39, Московская 42 и Немчиновская 85 соответствовала требованиям, предъявляемым к сильной хлебопекарной пшенице. Мука из зерна сорта Немчиновская 57 была средняя по силе (ценная по качеству), а Московская 56 – только филлер. В следующем году все образцы муки были сильными по качеству (улучшители). Энергия деформации теста превышала 250 е.а.

Таблица 2. Показатели качества зерна и муки

Сорт, линия/показатель качества	Стекловидность, %			Клейковина, %			ИДК			W, е.а.		
	2021	2022	Ср.	2021	2022	Ср.	2021	2022	Ср.	2021	2022	Ср.
Московская 39	64	62	63	34,8	34,8	34,7	67	79	73	306	245	276
Московская 56	41	78	60	31,2	31,2	32,4	58	92	75	179	256	217
Немчиновская 57	44	67	56	32,3	32,3	30,7	65	80	72	207	247	227
Немчиновская 85	57	71	64	32,6	32,6	32,6	80	82	81	309	369	339
Московская 42	49	58	54	31,8	27,6	29,7	81	80	80	254	270	262
В среднем	51	67	59	32,5	31,7	32,0	70	83	76	251	277	264

При оценке реологических свойств муки важное значение имеет показатель эластичности теста (табл. 3). Несмотря на то, что упругость теста (P), отражающая сопротивление блинка при растягивании его в шар, укладывалась в нормативные требования, эластичность теста во второй год эксперимента была выше, чем в первый. Это отчетливо видно при анализе показателя P/L, который в 2022 году имел более оптимальный уровень.

Таблица 3. Реологические свойства теста и качество выпечки хлеба

Сорт, линия /показатель	P			P/L			Объём хлеба, см <sup>3</sup>			Оценка подового хлеба, балл		
	2021	2022	Ср.	2021	2022	Ср.	2021	2022	Ср.	2021	2022	Ср.
Московская 39	126	109	118	2,0	1,2	1,6	859	1035	947	3,5	4,8	4,2
Московская 56	90	77	84	1,5	0,7	1,1	511	819	665	3,0	3,5	3,3
Немчиновская 57	78	78	78	0,9	0,8	0,9	629	752	690	3,0	4,0	3,5
Немчиновская 85	113	81	97	1,4	0,7	1,0	688	916	802	4,0	4,5	4,2
Московская 42	92	88	90	1,1	0,9	1,0	751	804	778	3,5	4,8	4,1
В среднем	100	87	93	1,4	0,9	1,1	688	865	776	3,4	4,3	3,9

Объём выпечки хлеба у всех образцов зависел в большей степени от погодных условий выращивания, чем от сортовых различий. При требуемом объёме выпечки из хлебопекарной муки не менее 400 см<sup>3</sup> объём хлеба составил более 500 см<sup>3</sup> в неблагоприятный год и превышал 1000 см<sup>3</sup> в год с более благоприятными условиями выращивания. Оценка качества подового хлеба была самой высокой у сорта Московская 39 и линии Московская 42. В целом мука по всем показателям соответствует требованиям, предъявляемым к хлебопекарной пшенице.

#### Заключение

Сорта Московская 39, Московская 56, Немчиновская 57, Немчиновская 85 и линия Московская 42, участвовавшие в испытаниях в условиях Московской области, при соблюдении технологий возделывания и внесении умеренных доз минеральных удобрений подтвердили свои показатели соответствия сильным и ценным сортам. Зерно и мука этих сортов соответствуют требованиям, предъявляемым к пшенице хлебопекарной по ГОСТ 34702-2020, что позволяет выпекать хлеб высокого качества.

#### Список литературы

1. Кузьмич М.А., Кузьмич Л.С. Тенденции изменения качества зерна в РФ за 1986–2022 гг. // Сборник научных трудов: под редакцией В.Н. Мазурова. «Научные основы устойчивого развития сельскохозяйственного производства в современных условиях»: Калуга: Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, 2023. С. 125-129.
2. Министерство сельского хозяйства РФ. Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. Первый. Общая часть. М. 2019. 329 с.
3. Министерство сельского хозяйства РФ. Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Технологическая оценка зерновых, крупяных и зернобобовых культур. М. 1988. 121 с.
4. Мелешкина Е.П. Современные требования, предъявляемые к качеству зерна пшеницы и пшеничной муки // Хлебопродукты. 2018. № 10. С. 14-15.
5. Кузьмич М.А., Сандухадзе Б.И., Бугрова В.В. Качество российского зерна – проблемы и перспективы // Агрофорум. 2020. № 4. С. 46-52.
6. Пахотина И.В. Сравнительная оценка хлебопекарного качества сортов яровой мягкой пшеницы питомника КАСИБ // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 7 (177). С. 16-22.
7. Пахотина И.В., Кашуба Ю.Н., Игнатьева Е.Ю., Трипутин В.М. Оценка коллекции озимой мягкой пшеницы на качество зерна // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 7(189). С. 10-16.

8. Сандухадзе Б.И., Мамедов Р.З., Крахмалёва М.С., Бугрова В.В. Научная селекция озимой мягкой пшеницы в Нечернозёмной зоне РФ: история, методы и результаты // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. № 25(4). С. 367-373.

**Productivity and baking quality of grain of varieties and lines of winter soft wheat selected by the Federal Research Center «Nemchinovka»**

**Bagrat I. Sandukhadze**

Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences  
Federal Research Center «Nemchinovka»  
Moscow, Russia  
sandukhade@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0000-0001-7184-7645

**Mikhail A. Kuzmich**

Doctor of Agricultural Sciences  
Federal Research Center «Nemchinovka»  
Moscow, Russia  
kuzmich@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0000-0000-0000-0000

**Ramin Z. Mamedov**

Candidate of Agricultural Sciences  
Federal Research Center «Nemchinovka»  
Moscow, Russia  
mamedov@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0000-0003-2473-4538

**Maria S. Krahmaleva**

Candidate of Agricultural Sciences  
Federal Research Center «Nemchinovka»  
Moscow, Russia  
krahmaleva@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0000-0002-0861-1514

**Valentina V. Bugrova**

Senior Researcher  
Federal Research Center «Nemchinovka»  
Moscow, Russia  
bugrova@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0009-0001-5730-7826

**Yaroslav S. Molodovsky**

Senior Researcher  
Federal Research Center «Nemchinovka»  
Moscow, Russia  
molodovski@ficnemchinovka.ru  
ORCID 0009-0004-0314-5245

Received 14.06.2023  
Accepted 22.11.2023  
Published 15.12.2023

UDC 633.11:664.64(470.41/45)  
EDN FTPAFT  
VAK 4.3.3. Food systems (engineering sciences)  
OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

### Abstract

The problem of producing wheat grain of the highest classes is relevant for the conditions of the whole world, in particular Russia. Selection plays an important role in solving this problem, since modern varieties differ not only in yield, but also in quality characteristics. For the conditions of the central region of the Russian Federation, the production of our own baking grain was achieved by introducing varieties of winter soft wheat selected by the Federal State Budgetary Institution "FRC "Nemchinovka". The work considered 4 varieties (Moskovskaya 39, Moskovskaya 56, Nemchinovskaya 57, Nemchinovskaya 85) and 1 line of winter soft wheat – Moskovskaya 42 according to 2021–2022 data. It was shown that the most productive variety among the tested was Nemchinovskaya 57, 6.19 and 8.64 t/ha, respectively. The quality indicators, as well as the yield, were significantly influenced by the conditions of the year. In 2022, weather conditions contributed to the formation of good grain quality. Among the studied numbers, the Moskovskaya 39 variety stands out, having a gluten content in flour of 34.7%, a volumetric yield of bread of 947 cm<sup>3</sup> over the years of research. In general, all studied varieties and lines correspond in their characteristics to strong and valuable wheat and can be recommended for the production of baking grain.

### Keywords

winter wheat yield, quality of grain and flour, dough rheology, laboratory baking of bread.

### References

1. Kuzmich M.A., Kuzmich L.S. Trends in grain quality in the Russian Federation for 1986-2022. // Collection of scientific papers: edited by V.N. Mazurov. «Scientific foundations of sustainable development of agricultural production in modern conditions»: Kaluga: Federal Potato Research Center named after A.G. Lorch, 2023. pp. 125-129.
2. Ministry of Agriculture of the Russian Federation. The methodology of the State variety testing of agricultural crops. Issue The first. The general part. M. 2019. 329 p.
3. The Ministry of Agriculture of the Russian Federation. The methodology of the State variety testing of agricultural crops. Technological assessment of cereals, cereals and legumes. M. 1988. 121 p.
4. Meleshkina E.P. Modern requirements for the quality of wheat grain and wheat flour // Bread products. 2018. No. 10. pp. 14-15.
5. Kuzmich M.A., Sandukhadze B.I., Bugrova V.V. The quality of Russian grain – problems and prospects // Agroforum, 2020, No. 4. pp. 46-52.
6. Pakhotina I.V. Comparative assessment of baking quality of spring soft wheat varieties of KASIB nursery // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2019. No. 7 (177). pp. 16-22.
7. Pakhotina I.V., Kashuba Yu.N., Ignatieva E.Yu., Triputin V.M. Evaluation of the collection of winter soft wheat for grain quality // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2020. No. 7(189). pp. 10-16.
8. Sandukhadze B.I., Mammadov R.Z., Krakhmaleva M.S., Bugrova V.V. Scientific breeding of winter soft wheat in the non-Chernozem zone of the Russian Federation: history, methods and results // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2021. No. 25(4). pp. 367-373.

Печатное издание «Хлебопечение России»  
Том 67 (2023). № 4

ISSN 2073-3569

Реестровая запись о регистрации 014330 от 10.01.1996г.  
Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и  
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Издание включено в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК и Российский  
индекс научного цитирования

Рукописи подвергаются редакционной обработке. Точки зрения авторов и редакционной коллегии могут  
не совпадать. Авторы публикуемых материалов несут ответственность за их научную достоверность

Адрес редакции: 109028, г. Москва, а/я 50, Российский Союз пекарей  
e-mail: [xcleb-vak@mail.ru](mailto:xcleb-vak@mail.ru), <https://hbreview.ru>

Подписано к размещению 15.12.2023.  
Отпечатано в типографии ООО «Российский союз пекарей», 109028, г. Москва, а/я 50.  
Подписано в печать 15.12.2023. Тираж 300 экз. Формат А4. Свободная цена.

Учредитель ООО «Российский союз пекарей», 2023

---

Printed edition «Bakery of Russia»  
Volume 67 (2023). Issue 4

ISSN 2073-3569

Registry record of registration 014330 dated 10.01.1996г.  
Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass  
Communications (Roskomnadzor)

The edition is included into The List of The Reviewed Scientific Publications recommended by The Highest  
Certifying Commission and The Russian Index of Scientific Citing

Manuscripts are exposed to editorial processing. The points of view of authors and an editorial board can not  
coincide. Authors of the published materials bear responsibility for their scientific reliability

Address of the editorial office: 109028, Moscow, a/ya 50, Russian Union of Bakers  
e-mail: [xcleb-vak@mail.ru](mailto:xcleb-vak@mail.ru), <https://hbreview.ru>

Signed for placement on 15.12.2023.  
Printed at the printing house of the NGO «Russian Bakers Union», 109028, Moscow, P.O. Box 50.  
Signed for printing on 15.12.2023. Print run of 300 copies. A4 format. Free price.

© Founder NGO «Russian Bakers Union», 2023