

Sarsekova Dani Nurgissayevna – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Dean of the Faculty of forestry and land resources, Kazakh National Agrarian Research University NJSC, Republic of Kazakhstan, 050000, Almaty, 8 Abai Ave., tel.: +7-701-316-14-42, e-mail: dani999@mail.ru.

Perzadayeva Akmaral Abuovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of ecology, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NJSC, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 62 Zhenis Ave., tel.: +7-705-532-77-14, e-mail: akma_72@mail.ru.

Toktassynova Faruza Abetovna – Candidate of Agricultural Sciences, PhD of the Department of forest resources, game management and fishery, Kazakh National Agrarian Research University NJSC, Republic of Kazakhstan, Almaty, Abai Avenue 8, tel.: +7-708-191-45-25, e-mail: rusenados@mail.ru.

Satybaldiyeva Gulshat Tursynaliyevna* – Master of Agricultural Sciences, Doctoral student, Kazakh National Agrarian Research University NJSC, Republic of Kazakhstan, 050000, Almaty, 8 Abai Ave., tel.: +7-702-532-47-90, e-mail: satybaldieva.gulshat@mail.ru.

МРНТИ:68.85.81

УДК-631.3

<https://doi.org/10.52269/RWEP2521164>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Салыков Б.Р. – кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент) кафедры аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Чашков В.Н. – заведующий лаборатории физико-химических и технологических исследований, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Мадин В.А. – докторант по специальности 8D06103 – Информационные технологии и робототехника, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Мануилов Н.В.* – инженер кафедры программного обеспечения, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

В статье представлен комплексный анализ технологических процессов изготовления деталей сельскохозяйственной техники, от которых в значительной степени зависят надёжность, устойчивость и эксплуатационный ресурс машин, используемых в агропромышленном производстве. Особое внимание уделено исследованию требований к геометрическим параметрам и физико-механическим свойствам конструкционных материалов, поскольку эти характеристики напрямую определяют точность сборки, износостойкость, прочность и долговечность узлов техники. Рассмотрены ключевые параметры, обеспечивающие надлежащее качество деталей: прочность на растяжение, ударная вязкость, твёрдость, пластичность, износостойкость и коррозионная устойчивость. Проанализированы современные методы термической обработки, включая закалку, отжиг, нормализацию и отпуск, а также их влияние на формирование внутренней структуры металла и улучшение механических свойств. Дополнительно исследуются методы легирования стали и химической модификации поверхности, такие как науглероживание, хромирование и добавление легирующих элементов (марганец, бор, кремний), которые повышают сопротивляемость деталей внешним нагрузкам и воздействию агрессивной среды. Приведён сравнительный анализ различных режимов термообработки стали Л65 с использованием статистических методов, позволяющий выявить оптимальные технологические параметры.

Сделан вывод о важности комплексного подхода к проектированию и производству деталей сельскохозяйственной техники, включающего выбор точности изготовления, режимов обработки и состава материала, что позволяет существенно повысить надёжность и эффективность машин в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: точность изготовления, термообработка, легирование сталей, износостойкость, коррозионная стойкость, прочность.

АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ТЕХНИКАСЫНЫҢ БӨЛШЕКТЕРІН ЖАСАУДЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҮДЕРІСТЕРІН ЖЕТІЛДІРУ

Салықов Б.Р. – техника ғылымдарының кандидаты, Аграрлық техника және көлік кафедрасының қауымдастырылған профессоры (доцент), «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Чашков В.Н. – физика-химиялық және технологиялық зерттеулер зертханасының меңгерушісі, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Мадин В.А. – 8D06103 – Ақпараттық технологиялар және робототехника мамандығы бойынша докторант, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Мануйлов Н.В.* – Бағдарламалық қамтамасыз ету кафедрасының инженері, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Мақалада ауыл шаруашылығы техникасының сенімділігіне, тұрақтылығына және пайдалану мерзіміне елеулі әсер ететін бөлшектерді дайындаудың технологиялық үдерістері жан-жақты талданған. Конструкциялық материалдардың геометриялық параметрлері мен физика-механикалық қасиеттеріне қойылатын талаптарды зерттеуге ерекше назар аударылған, себебі бұл сипаттамалар техникалық тораптардың жинақтау дәлдігін, тозуға төзімділігін, беріктігін және ұзақ қызмет етуін тікелей анықтайды. Бөлшектердің сапасын қамтамасыз ететін негізгі параметрлер қарастырылған: созылу беріктігі, соққы тұтқырлығы, қаттылық, пластикалығы, тозуға және коррозияға төзімділігі. Металлдың ішкі құрылымының қалыптасуына және механикалық қасиеттерінің жақсаруына әсер ететін қазіргі заманғы термиялық өңдеу әдістері – шынықтыру, жібіту, қалыпқа келтіру және төздіру талданған. Сонымен қатар, бөлшектердің сыртқы әсерлерге және агрессивті ортаға төзімділігін арттыратын болатты қоспалау және беткі қабатын химиялық жолмен түрлендіру әдістері – көміртектендіру, хромдау және легирлеуші элементтерді (марганец, бор, кремний) енгізу зерттелген. L65 болатына әртүрлі термиялық өңдеу режимдерінің статистикалық әдістер арқылы салыстырмалы талдауы беріліп, оңтайлы технологиялық параметрлер анықталған.

Ауыл шаруашылығы техникасы бөлшектерін жобалау мен өндіруге кешенді тәсіл – дайындау дәлдігін, өңдеу режимдерін және материал құрамын дұрыс таңдауды қамтитын тәсіл – машиналардың нақты пайдалану жағдайларындағы сенімділігі мен тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік беретіні туралы қорытынды жасалған.

Түйінді сөздер: дайындау дәлдігі, термиялық өңдеу, болатты қоспалау, тозуға төзімділік, коррозияға төзімділік, беріктік.

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR MANUFACTURING PARTS OF AGRICULTURAL MACHINERY

Salykov B.R. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of agricultural machinery and transport, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Chashkov V.N. – Head of the Laboratory for Physical and Chemical and Production Research, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Madin V.A. – Doctoral student, “8D06103 – Information technologies and robotics” educational program, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Manuilov N.V.* – Engineer of the Department of software, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

The article presents a comprehensive analysis of technological processes in the manufacturing of parts for agricultural machinery, which significantly affect the reliability, stability, and service life of machines used in agro-industrial production. Particular attention is given to the study of requirements for the geometric parameters and physical and mechanical properties of structural materials, as these characteristics directly determine assembly precision, wear resistance, robustness, and durability of machinery components. Key parameters ensuring proper quality of parts are considered, such as tensile strength, resilient modulus, hardness, ductility, wear resistance, and corrosion resistance. Modern heat treatment methods are analyzed, including hardening, annealing, normalization, and tempering, as well as their influence on the internal structure of the metal and improvement of mechanical properties. Additionally, methods of steel alloying and chemical surface modification – such as carburizing, chromium plating, and the addition of alloying elements (manganese, boron, silicon) – are explored, as they enhance the resistance of parts to external loads and aggressive environments. A comparative analysis of different heat treatment regimens for steel grade L65 is provided using statistical methods, allowing the identification of optimal technological parameters.

The study concludes that a comprehensive approach to the design and production of agricultural machinery parts – including the choice of manufacturing accuracy, treatment regimens, and material composition – can significantly increase the reliability and efficiency of machines under real operating conditions.

Key words: manufacturing accuracy, heat treatment, steel alloying, wear resistance, corrosion resistance, robustness.

Введение

Современное сельскохозяйственное машиностроение требует высокоточных и надёжных технологических решений, обеспечивающих долговечность и эффективность работы оборудования в условиях интенсивной эксплуатации. Одним из ключевых факторов, определяющих ресурс и надёжность сельскохозяйственных машин, является качество изготовления деталей, их геометрическая точность и физико-механические свойства материалов. Важную роль в технологическом процессе играет подбор оптимальных режимов обработки металлов, включая термическую обработку (закалку, отпуск, нормализацию, отжиг), а также легирование и модификацию химического состава стали. Эти методы позволяют улучшить прочностные характеристики, повысить износостойкость и коррозионную стойкость деталей, что особенно важно для узлов, работающих в агрессивных средах и под воздействием динамических нагрузок. Настоящая работа направлена на анализ современных подходов к изготовлению деталей сельскохозяйственной техники, включая требования к точности производства, методы термообработки и влияние легирования на эксплуатационные характеристики. Рассматриваются возможности оптимизации технологических процессов для повышения эффективности работы сельскохозяйственного оборудования, а также перспективы применения новых материалов и технологий в данной отрасли.

Цель данной работы – комплексно исследовать технологические аспекты изготовления деталей сельскохозяйственной техники с учётом современных требований к точности, механическим свойствам и методам обработки. В условиях интенсивной эксплуатации машин важно обеспечить высокую износостойкость, прочность и коррозионную стойкость конструктивных элементов. В рамках данной работы проводится исследование влияния различных параметров обработки на механические свойства деталей, а также разрабатываются рекомендации по совершенствованию технологических процессов для повышения долговечности сельскохозяйственного оборудования.

Задачи исследования

Чтобы достигнуть поставленной цели, в ходе работы решались следующие задачи:

- Анализ критериев точности изготовления на примере квалитетов IT 4–IT 17, с акцентом на диапазон IT 6–IT 16, наиболее актуальный в сельскохозяйственном машиностроении [1, с. 230];
- Определение ключевых физико-механических свойств (прочность, пластичность, ударная вязкость, износостойкость, коррозионная стойкость), оказывающих решающее влияние на эксплуатационный ресурс деталей;
- Исследование методов термообработки (закалка, отжиг, отпуск, нормализация) и выявление наиболее эффективных режимов для конкретных марок сталей.

Таким образом, производство сельскохозяйственной техники представляет собой многоэтапный технологический процесс, в котором изготовление отдельных деталей играет ключевую роль, поскольку именно из них формируются сборочные единицы, узлы, агрегаты и конечные машины. Высокие требования к надёжности и долговечности техники, работающей в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок, обуславливают необходимость строгого контроля качества и точности изготовления деталей.

При этом особое внимание уделяется не только геометрическим параметрам, но и физико-механическим свойствам материалов, от которых напрямую зависят продолжительность службы деталей и общая производительность машин.

Большинство исследований в области сельскохозяйственного машиностроения сосредоточено на разработке усовершенствованных методов обработки металлов, позволяющих повысить прочность, износостойкость и коррозионную стойкость деталей. В частности, значительный вклад в исследования по автоматизации и роботизации сельскохозяйственных систем вносит Professor Qin Zhang (Washington State University, США), рассматривающий вопросы применения современных материалов и мехатронных решений. [2, с. 7]

В то же время Professor John Schueller (University of Florida, США) изучает технологию производства и оценку прочности узлов, включая вопросы структурной оптимизации для высоконагруженных сельскохозяйственных орудий.

Дополнительно, Dr. Jianbo Wang (China Agricultural University, Китай) проводит исследования в области инновационных методов обработки металлов, включая термическую обработку и легирование сталей с целью повышения механических характеристик в аграрной технике.

В отечественной и зарубежной литературе указываются различные подходы к определению оптимальных квалитетов точности для деталей сельскохозяйственной техники, которые чаще всего варьируются в диапазоне от IT 6 до IT 16. Prof. Sergio Torres и Dr. Maria Calvo (Polytechnic University of Madrid, Испания) предлагают прецизионные методики конструирования узлов и агрегатов, ориентированные на повышение эффективности и экологичности производства. Это связано с тем, что для высоконагруженных узлов (валы, подшипники, гидравлические механизмы) необходимы более строгие допуски, тогда как крупногабаритные или сварные конструкции могут иметь менее жесткие требования. Таким образом, в процессе выбора технологий изготовления и обработки учитывают сразу несколько

факторов: особенности конструкционной стали, экономическую эффективность и условия эксплуатации сельскохозяйственной техники.

Статья рассматривает ключевые аспекты развития технологических процессов в сельскохозяйственном машиностроении, включая контроль геометрической точности и термическую обработку, с целью систематизации и анализа современных производственных тенденций.

Материалы и методы исследования

1. Критерии точности изготовления деталей

В рамках исследования была проанализирована точность изготовления деталей сельскохозяйственной техники на основе системы квалитетов (от IT 4 до IT 17) в соответствии с DIN ISO 286. Особое внимание уделялось квалитетам, применяемым в отрасли (IT 6–IT 16), условно разбитым на три основные группы:

IT 6–IT 8 – высокоточные узлы (например, валы, подшипники, гидравлические механизмы);

IT 9–IT 11 – детали средней точности (корпусные элементы, крепёжные детали, блоки, рамы);

IT 12–IT 14 – крупногабаритные и сварные конструкции, где предъявляются менее жёсткие требования к точности [3, с. 501].

Для определения фактической точности изготовления применялись координатно-измерительные машины (КИМ) Mitutoyo Crysta-Plus M 7106 (точность $\pm 2,2$ мкм). Контроль отклонений формы и расположения поверхностей, а также допусков размеров осуществлялся согласно ГОСТ 24642-89, ГОСТ 24643-81 [4, с. 1634]. Полученные результаты заносились в общую базу данных и сопоставлялись с требованиями соответствующих квалитетов. Статистический анализ устойчивости процессов изготовления проводился с использованием дисперсионного анализа (ANOVA) и критерия Стьюдента с уровнем значимости $\alpha = 0,05$.

2. Оценка физико-механических свойств деталей

На этапе испытаний учитывались ключевые механические и эксплуатационные свойства, влияющие на работоспособность и срок службы сельскохозяйственной техники:

Прочность (σ) – контролировалась путём стандартных разрывных испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497-84. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron 3369. Использовались цилиндрические образцы диаметром 10 мм и длиной 50 мм. Скорость растяжения составляла 5 мм/мин. Для каждого режима термической обработки испытывалось не менее 5 образцов.

Упругость (E) – определялась из кривой растяжения или изгиба, полученной в ходе испытаний на растяжение [5, с. 78].

Пластичность (δ и ψ) – рассчитывалась по относительному удлинению и сужению после испытаний на разрыв.

Соппротивление ударным нагрузкам – испытания по методам Шарпи и Изода в соответствии с ГОСТ 22762-77 и ГОСТ 9454-78 соответственно. Испытания проводились на маятниковом копре Instron Dynatup 9250. Для каждого режима термической обработки испытывалось не менее 10 образцов.

Износостойкость – оценивалась с помощью абразивных тестов на машине трения Pin-on-Disk при нагрузке 10 Н и скорости скольжения 0,1 м/с в течение 1 часа, а также машинных испытаний в условиях, приближённых к реальным полевым (описание условий испытаний).

Коррозионная стойкость – испытывалась в камере соляного тумана Ascott S450 при температуре 35 °C и концентрации NaCl 5% в соответствии с ГОСТ 9.308-85, а также при погружении в агрессивные среды (указать состав и концентрацию сред, температуру, время испытаний).

В рамках расширения исследования дополнительно проводили акустико-эмиссионный контроль (АЭК) на образцах, подвергнутых закалке. АЭК проводился с использованием системы A-Line 500D (Vallen Systeme GmbH). Датчики устанавливались на поверхность образцов и регистрировались сигналы акустической эмиссии при нагружении образцов. Анализ сигналов АЭК проводился с целью выявления и оценки роста микротрещин в процессе эксплуатации [6, с. 93].

3. Методы термической обработки

В исследовании использовался широкий спектр термообработки, учитывавший химический состав стали и желаемые эксплуатационные свойства:

Закалка – для повышения твёрдости и стойкости к абразивному износу. Закалка стали Л65 проводилась в трех режимах:

Режим А: нагрев до 820 °C, выдержка 30 мин, охлаждение в масле;

Режим В: нагрев до 860 °C, выдержка 40 мин, охлаждение в масле;

Режим С: нагрев до 900 °C, выдержка 45 мин, охлаждение в масле.

Отжиг – уменьшение внутренних напряжений, повышение пластичности и облегчение последующей обработки. Отжиг проводился при температуре 650 °C с последующим медленным охлаждением в печи.

Отпуск – корректировка соотношения прочности и вязкости после закалки. Отпуск проводился при температуре 200 °C в течение 2 часов.

Нормализация – формирование равномерной структуры, повышение стабильности механических свойств. Нормализация проводилась при температуре 880 °С с последующим охлаждением на воздухе.

Термическая обработка осуществлялась в электрической печи Nabertherm N 7/H. Контроль качества термообработки осуществляли с помощью твердомеров Affri N 150 (по Роквеллу, шкала С, ГОСТ 9013-75) и Affri В 3000 (по Бринеллю, ГОСТ 9012-59) и металлографического анализа шлифов. Металлографический анализ проводился на оптическом микроскопе Olympus GX51. Подготовка шлифов включала шлифовку на абразивных бумагах различной зернистости и травление 4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Дополнительно применяли электронную микроскопию на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV, что позволило получить детальные сведения о микроструктуре (например, распределении карбидных фаз). Образцы для электронной микроскопии подготавливались путем полировки и травления [7, с. 11230].

Результаты исследования и обсуждения

Ниже приведена таблица с обобщёнными данными по трём режимам закалки стали Л65 (А, В и С), где различались температура нагрева (T , °С) и время выдержки (t , мин.). Параметры прочности σ_v , твёрдости (HRC) и ударной вязкости (KCU, Дж/см²) представлены как средние значения $\bar{x}$ и стандартные отклонения (S):

Таблица 1 – Обобщенные данные по режимам закалки

Режим	T , °С	t , мин	МПа ($\pm S$)	HRC ($\pm S$)	KCU, Дж/см ² ($\pm S$)
А	820	30	980 $\pm$ 15	46 $\pm$ 1	68 $\pm$ 2
В	860	40	995 $\pm$ 12	48 $\pm$ 1.5	64 $\pm$ 3
С	900	45	1010 $\pm$ 10	50 $\pm$ 1	60 $\pm$ 4

По данным таблицы 1, режим С обеспечивает наибольшую твёрдость, однако сопровождается некоторым снижением ударной вязкости. Эти различия подтверждаются результатами дисперсионного анализа ($p < 0,05$), что указывает на статистически значимое влияние температуры и времени закалки на механические свойства стали Л65 [8, с. 89].

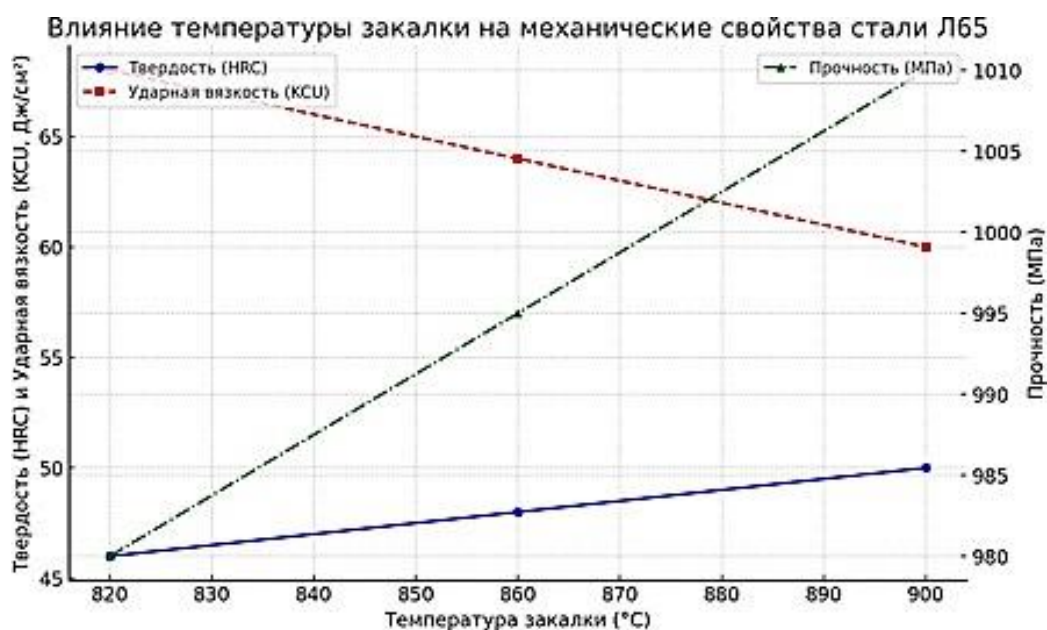


Рисунок 1 – Влияние температуры закалки

Рисунок 1, иллюстрирующий влияние температуры закалки на твердость (HRC), ударную вязкость (KCU) и прочность (МПа) стали Л65. Видно, что с увеличением температуры закалки прочность и твердость растут, тогда как ударная вязкость снижается [9, с. 153].

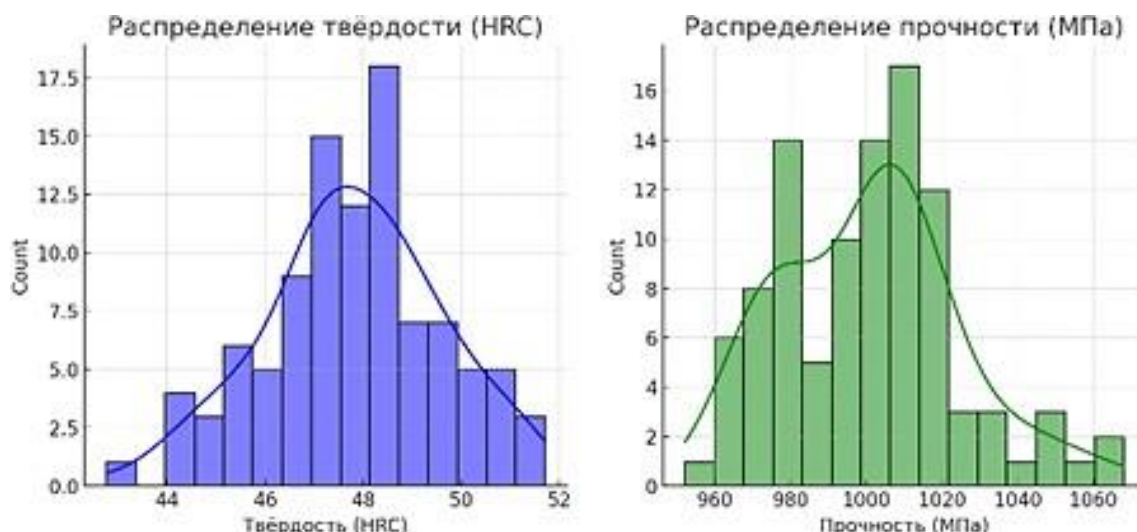


Рисунок 2 – Результаты статистического анализа

На рисунке 2 гистограммы показывают, что твёрдость (HRC) и прочность (МПа) распределены относительно нормально, но с небольшими вариациями.

Прочность имеет небольшую положительную асимметрию, что может указывать на наличие более прочных образцов в выборке [10, с. 36].

Корреляционный анализ:

Корреляция между твёрдостью и прочностью: -0.136 , что указывает на слабую отрицательную связь. Корреляция между содержанием марганца и прочностью: 0.109 , что также говорит о слабой положительной зависимости.

Оба коэффициента указывают на отсутствие выраженной линейной зависимости между переменными.

Регрессионный анализ:

Модель предсказания прочности на основе твёрдости и содержания марганца имеет $R^2=0.030$, что означает, что переменные объясняют только 3% изменчивости прочности [11, с. 47].

Закключение

Исследование подтвердило значимость выбора оптимальных режимов термообработки стали Л65 для повышения её эксплуатационных характеристик. Анализ различных режимов закалки показал, что повышение температуры нагрева способствует увеличению твёрдости и прочности, однако сопровождается снижением ударной вязкости.

Статистический анализ выявил слабую отрицательную корреляцию между твёрдостью и прочностью (-0.136), а также незначительное влияние содержания марганца на механические свойства стали. Построенная регрессионная модель показала низкую предсказательную способность ($R^2 = 0.030$), что указывает на влияние дополнительных технологических и структурных факторов.

Для высоконагруженных узлов сельскохозяйственной техники целесообразно применять качества IT 6–IT 8, тогда как для корпусных и сварных элементов допустим диапазон IT 9–IT 11. Это позволяет обеспечить баланс между надёжностью, стоимостью и технологичностью изготовления.

Таким образом, комплексный подход к производству деталей, включающий рациональный выбор методов термообработки, точностных допусков и видов легирования, является ключевым фактором повышения эффективности сельскохозяйственной техники, особенно в условиях высоких эксплуатационных нагрузок и агрессивной среды. [12, с. 56]

В последующих этапах планируется расширение экспериментальной базы за счёт включения дополнительных марок сталей, а также исследование влияния различных типов термической и химико-термической обработки. Особое внимание будет уделено моделированию нелинейных взаимосвязей между технологическими параметрами и механическими свойствами с использованием методов машинного обучения. Это позволит создать более точные предиктивные модели и сформировать рекомендации для автоматизации выбора режимов обработки в условиях серийного и массового производства [13, с. 67].

Исследование выполнено в рамках проекта ИРН BR24992785 «Организация и проведение комплексных исследований по обеспечению устойчивого развития агропромышленного комплекса Костанайской области с созданием научно-исследовательского технологического центра».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Grigoriev, S.N. Trends in Precision Engineering and Technological Processes for Agriculture [Текст] / S.N. Grigoriev, M.A. Volosova // *Procedia CIRP*. – 2021. – Т. 104. – С. 229–234. – DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.039.
2. Zhang, Q. Advances in Intelligent Manufacturing Systems for Agricultural Machinery [Текст] / Q. Zhang, J. Wang // *Biosystems Engineering*. – 2020. – Т. 189. – С. 1–9. – DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.11.004.
3. Dimitrov, D. Digital Twin Technologies in Manufacturing for Smart Agriculture [Текст] / D. Dimitrov, R. Schmitt, A. Verl // *CIRP Annals*. – 2019. – Т. 68, № 1. – С. 499–502. – DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.106.
4. Chashkov, V.N. Analysis of the legal and regulatory status of the basic notions and procedures of the state system of ensuring the unity of measurements of the Republic of Kazakhstan in relation to the conformity assessment and confirmation of compliance of measurement instruments [Текст] / V.N. Chashkov, O. Salykova, I.V. Ivanova, N.A. Baganov, Y.V. Benyukov // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 1629–1659. – ISSN 0976-6340.
5. Handbook of Farm, Dairy, and Food Machinery Engineering [Текст] / ed. M. Kutz. – Amsterdam: Elsevier, 2018. – 584 с.
6. Ashby, M.F. Materials Selection in Mechanical Design [Текст] / M.F. Ashby. – 6th ed. – Amsterdam: Elsevier, 2021. – 585 с.
7. Kim, Y. Heat Treatment of Steels for Agricultural Equipment: Performance Optimization [Текст] / Y. Kim, J. Park // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Т. 9, № 5. – С. 11225–11234. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.089.
8. Abdel-Basset, M. A New Hybrid Machine Learning Model for Predictive Maintenance in Smart Agriculture [Текст] / M. Abdel-Basset, G. Manogaran, M. Mohamed // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2021. – Т. 189. – Ст. 106421. – DOI: 10.1016/j.compag.2021.106421.
9. Luo, X. Machine Learning for Mechanical Property Prediction in Manufacturing Processes [Текст] / X. Luo, et al. // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2023. – Т. 66. – С. 148–161. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.12.005.
10. Корзукин, И.М. Современные процессы обработки деталей сельхозтехники [Текст] / И.М. Корзукин, М.А. Сидоров // *Механизация сельского хозяйства*. – 2020. – № 4. – С. 33–38.
11. Шарда, А. Оптимизация технологии посевного оборудования [Текст] / А. Шарда, М.Ф. Кочер // *Агропромышленная техника*. – 2019. – № 2. – С. 45–49.
12. Салыков, Б.Р. Применение высокопрочных материалов при изготовлении сельскохозяйственной техники [Текст] / Б.Р. Салыков, О.С. Салыкова, Д.Н. Комаров, Н.В. Мануйлов // *Многопрофильный научный журнал «3i: intellect, idea, innovation – интеллект, идея, инновация»*. – 2025. – № 1. – С. 194–200. DOI: 10.52269/22266070_2025_1_194.
13. Контрбаева, Ж.Д. Мобильное приложение для транспортировки сельскохозяйственной продукции [Текст] / Ж.Д. Контрбаева, Б.Р. Салыков // *Многопрофильный научный журнал «3i: intellect, idea, innovation – интеллект, идея, инновация»*. – 2023. – № 3. – С. 59–71. DOI: 10.52269/22266070_2023_3_59.

REFERENCES:

1. Grigoriev S.N., Volosova M.A. Trends in precision engineering and technological processes for agriculture. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 104, pp. 229–234. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.039.
2. Zhang Q., Wang J. Advances in intelligent manufacturing systems for agricultural machinery. *Biosystems Engineering*, 2020, vol. 189, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.11.004.
3. Dimitrov D., Schmitt R., Verl A. Digital twin technologies in manufacturing for smart agriculture. *CIRP Annals*, 2019, vol. 68, no. 1, pp. 499–502. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.106.
4. Chashkov V.N., Salykova O., Ivanova I.V., Baganov N.A., Benyukov Y.V. Analysis of the legal and regulatory status of the basic notions and procedures of the state system of ensuring the unity of measurements of the Republic of Kazakhstan in relation to the conformity assessment and confirmation of compliance of measurement instruments. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 1629–1659. ISSN 0976-6340.
5. Kutz M. (ed.) *Handbook of Farm, Dairy, and Food Machinery Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 2018. 584 p.
6. Ashby M.F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2021. 585 p.
7. Kim Y., Park J. Heat treatment of steels for agricultural equipment: performance optimization. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 11225–11234. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.089.

8. Abdel-Basset M., Manogaran G., Mohamed M. A new hybrid machine learning model for predictive maintenance in smart agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, vol. 189, article 106421. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106421.
9. Luo X., et al. Machine learning for mechanical property prediction in manufacturing processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, vol. 66, pp. 148–161. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.12.005.
10. Korzukin I.M., Sidorov M.A. Sovremennyy'e processy' obrabotki detalej sel'hoztehniki [Modern processing techniques for agricultural machinery parts]. *Mehanizaciya sel'skogo hozyajstva*, 2020, no. 4, pp. 33–38. (In Russian)
11. Sharda A., Kocher M.F. Optimizaciya tehnologii posevnogo oborudovaniya [Optimization of sowing equipment technology]. *Agropromy'shlennaya tehnika*, 2019, no. 2, pp. 45–49. (In Russian)
12. Salykov B.R., Salykova O.S., Komarov D.N., Manuilov N.V. Primenenie vy'sokoprochny'h materialov pri izgotovlenii sel'skohozyajstvennoj tehniki [Application of high-strength materials in the manufacturing of agricultural machinery]. *3i: intellect, idea, innovation*, 2025, no. 1, pp. 194–200. DOI: 10.52269/22266070_2025_1_194. (In Russian)
13. Kontrobaeva Zh.D., Salykov B.R. Mobil'noe prilozhenie dlya transportirovki sel'skohozyajstvennoj produkci [Mobile application for transportation of agricultural products]. *3i: intellect, idea, innovation*, 2023, no. 3, pp. 59–71. DOI: 10.52269/22266070_2023_3_59. (In Russian).

Сведения об авторах:

Салыков Булат Рахимжанович – кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент) кафедры аграрной техники и транспорта факультета машиностроения, энергетики и информационных технологий, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, ул. Воинов Интернационалистов, 2а; тел.: +7-775-819-03-43, e-mail: salykovbulat@mail.ru.

Чашков Вадим Николаевич – заведующий лаборатории физико-химических и технологических исследований, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, улица Гоголя, 44, тел.: +7-777-373-03-69, e-mail: vaimkoenshtein@gmail.com.

Мадин Владимир Анатольевич – докторант по специальности 8D06103 – Информационные технологии и робототехника кафедры программного обеспечения факультета машиностроения, энергетики и информационных технологий, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, Юбилейный 37-22, тел.: +7-705-451-91-13, e-mail: vmadin@mail.ru.

Мануйлов Николай Владимирович* – инженер кафедры программного обеспечения факультета машиностроения, энергетики и информационных технологий, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110012, г. Костанай, ул. Геологическая, 1, тел.: +7-777-231-54-58, e-mail: mnlv.nv.94@gmail.com.

Салыков Булат Рахимжанұлы – техникалық ғылымдар кандидаты, ауыл шаруашылығы техникасы және көлік кафедрасының қауымдастырылған профессоры (доценті), «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Интернационалист-жауынгерлер көш, 2а; тел: +7-775-819-03-43, e-mail: salykovbulat@mail.ru.

Чашков Вадим Николаевич – физика-химиялық және технологиялық зерттеулер зертханасының меңгерушісі, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Гоголь көш, 44; тел: +7-777-373-03-69, e-mail: vaimkoenshtein@gmail.com.

Мадин Владимир Анатольевич – 8D06103 – Ақпараттық технологиялар және робототехника мамандығы бойынша докторант, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Юбилейный шағын ауданы, 37-22; тел: +7-705-451-91-13, e-mail: vmadin@mail.ru.

Мануйлов Николай Владимирович* – бағдарламалық қамтамасыз ету кафедрасының инженері, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110012, Қостанай қ., Геологиялық көш, 1; тел: +7-777-231-54-58, e-mail: mnlv.nv.94@gmail.com.

Salykov Bulat Rakhimzhanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of agricultural machinery and transport, Faculty of mechanical engineering, power engineering and information technologies, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 2a Voinov Internatsionalistov Str., tel.: +7-775-819-03-43, e-mail: salykovbulat@mail.ru.

Chashkov Vadim Nikolayevich – Head of the Laboratory of Physical and chemical and Production Research, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 44 Gogol Str., tel.: +7-777-373-03-69, e-mail: vaimkoenshtein@gmail.com.

Madin Vladimir Anatoliyevich – Doctoral student, “8D06103 – Information technologies and robotics” educational program, Department of Software, Faculty of mechanical engineering, power engineering and information technologies, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 37-22 Yubileiniy, tel.: +7-705-451-91-13, e-mail: vmadin@mail.ru.

Manuilov Nikolay Vladimirovich* – Engineer of the Department of software, Faculty of mechanical engineering, power engineering and information technologies, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110012, 1 Kostanay, Geologicheskaya Str., tel: +7-777-231-54-58, e-mail: mnlv.nv.94@gmail.com.

IRSTI: 68.85.39

UDC:631.559

<https://doi.org/10.52269/RWEP2521172>

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF GREENHOUSE MICROCLIMATE PARAMETERS TO ENHANCE TOMATO YIELD IN THE NORTHERN KAZAKHSTAN CONDITIONS

Sapa V.Yu. * – Candidate of Technical Sciences, acting Associate Professor, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

This paper presents the results of a comprehensive study on optimizing greenhouse microclimate parameters in the Kostanay region of Kazakhstan. The relevance of the study is determined by the need to improve agricultural production efficiency in regions with unfavorable climatic conditions. The study focuses on developing a mathematical model for microclimate parameter control in tomato cultivation – one of the most economically important greenhouse crops. The research employed advanced mathematical modeling methods, including multiple regression analysis, response surface methodology (RSM), and numerical optimization techniques. The experimental base included the "Kostanay Greenhouses" facility equipped with automated environmental control systems. The study involved continuous monitoring of temperature, humidity, CO₂ concentration, and light intensity using high-precision sensors. The results indicate that optimal microclimate parameters for tomatoes are: daytime temperature 25-28°C (night time 16-18°C), relative humidity 60-65%, CO₂ concentration 1000-1100 ppm, and light intensity 12-14 thousand lux. The developed adaptive control model maintains these parameters with $\pm 2\%$ accuracy, resulting in 22-27% yield increase compared to conventional growing methods. Of particular importance is the proposed energy-saving system incorporating renewable energy sources. Calculations show 15-18% reduction in energy consumption while maintaining high yield indicators. The practical significance of the study is confirmed by the implementation of results at production facilities in the region.

Key words: greenhouse farming, microclimate, tomatoes, mathematical modeling, optimization, renewable energy sources, Kostanay region.

СОЛТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН ЖАҒДАЙЫНДА ҚЫЗАНАҚ ӨНІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН ЖЫЛЫЖАЙ МИКРОКЛИМАТЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ОҒТАЙЛАНДЫРУ

Сапа В. Ю.* – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор м.а., «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Бұл мақалада Қазақстанның Қостанай облысы жағдайында жылыжай кешендерінің микроклиматын оңтайландыру бойынша кешенді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жұмыстың өзектілігі қолайсыз климаттық жағдайлары бар өңірлерде ауыл шаруашылығы өндірісінің тиімділігін арттыру қажеттілігіне байланысты. Қызанақ өсіру үшін микроклимат параметрлерін басқарудың математикалық моделін жасауға баса назар аударылады, яғни бұл экономикалық маңызды жылыжай дақылдарының бірі. Зерттеу математикалық модельдеудің заманауи әдістерін, соның ішінде бірнеше регрессиялық талдауды, жауап бетінің әдісін (RSM) және сандық оңтайландыру әдістерін қолдана отырып жүргізілді. Эксперименттік базаға қоршаған орта параметрлерін бақылаудың автоматтандырылған жүйесімен жабдықталған "Қостанай жылыжайлары" ЖШС жылыжай кешені кірді. Жұмыс барысында жоғары дәлдіктегі датчиктерді қолдана отырып, температура, ылғалдылық, СО₂ концентрациясы және жарық деңгейіне мониторинг жүргізілді. Нәтижелер қызанақ үшін микроклиматтың оңтайлы параметрлері: тәуліктік температура 25-28°C (Түнгі 16-18°C), салыстырмалы ылғалдылық 60-65%, СО₂ концентрациясы 1000-1100 ppm, жарықтандыру 12-14 мың люкс. Әзірленген адаптивті басқару моделі бұл параметрлерді $\pm 2\%$ дәлдікпен сақтауға мүмкіндік береді, бұл дәстүрлі өсіру әдістерімен салыстырғанда өнімділіктің 22-27% өсуін қамтамасыз етеді.