

СЪВРЕМЕННИ АНТИВИБРАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТИ ЗА РАЗСТЪРГВАНЕ НА ДЪЛБОКИ ОТВОРИ-ОБЗОР

ПЛАМЕН КАСАБОВ, КОНСТАНТИН ЧУКАЛОВ

Технически университет София, филиал Пловдив
kasabov_p@tu-plovdiv.bg, chukalov@tu-plovdiv.bg

Резюме: Настоящата обзорна статия разглежда развитието на антивибрационните борцанги за разстъргване на отвори, като акцентира върху материалите, конструктивните решения и технологиите, използвани за намаляване на самовъзбуждащите се вибрации при вътрешна механична обработка. Представени са съвременни инструментални материали – от въглеродни и легирани стомани до композити и сплави с памет на формата. Анализирани са иновативни демпфиращи технологии, включително пасивни и активни системи, пиезоелектрични актуатори, вибрационни абсорбери и интелигентни системи за мониторинг. Цитирани са множество експериментални и теоретични разработки на водещи изследователски екипи, които демонстрират ефективността на съвременните решения за потискане на вибрациите при разстъргване. Направен е извод, че бъдещето на антивибрационните борцанги е в интеграцията на адаптивни алгоритми, сензори в реално време и интелигентни материали, които могат да отговорят на изискванията на прецизната и автоматизирана индустрия.

Ключови думи: анти-вибрационна борцанга; разстъргване; вибрации; демпфиране; пиезоелектричен актуатор; композитни материали.

CURRENT ANTI-VIBRATION TECHNOLOGIES AND DEEP HOLES BORING TOOLS – A REVIEW

PLAMEN KASABOV, KONSTANTIN CHUKALOV

Technical University of Sofia, branch Plovdiv
kasabov_p@tu-plovdiv.bg, tu-plovdiv.bg

Abstract: The review article discusses the development of anti-vibration deep holes boring, focusing on materials, design solutions and technologies used to reduce unwanted vibrations in internal machining. Historical aspects related to the evolution of tool materials from carbon and alloy steels to composites and shape memory alloys are presented. Innovative damping approaches are analyzed, including passive and active systems, piezoelectric actuators, vibration absorbers, and intelligent monitoring systems. Numerous experimental and theoretical papers by leading research teams are cited to demonstrate the effectiveness of current solutions for vibration suppression in reaming. It is concluded that the future of anti-vibration boring machines lies in the integration of adaptive algorithms, real-time sensors and intelligent materials that can meet the demands of precision and automated industry.

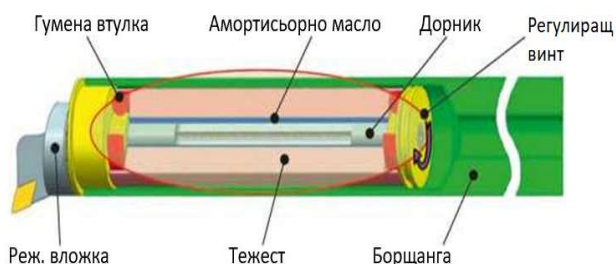
Translated with DeepL.com (free version)

Keywords: anti-vibration boring bar, vibrations, damping system, piezoelectric actuator, composite materials

1. Въведение

Антивибрационните борщанги за разстъргване на отвори представляват специализирани инструменти, предназначени за обработка на дълбоки или трудно достъпни отвори с висока точност на форма и размерите на отвора. Основен фактор за процеса разстъргване е стабилността на системата. Най-голям интерес проявяване към стабилността инструмента, а тя от своя страна зависи от еластичните деформации и вибрациите.

Инструментите се състоят от режеща глава, удължено тяло, демпфиращ модул и система за охлаждане. Обикновено режещите глави са монолитни или съставни със сменяеми твърдосплавни пластини. В инженерната практика често се налага обработването на дълбоки отвори с малък диаметър при които се достига до коефициент на конзолност на инструмента в порядъка на 12-14 пъти диаметъра на тялото. Тази конзолност оказва съществена роля в появата на вибрации при рязане. При коефициент на конзолност над 4 е необходимо вземането на специални мерки за демфериране на вибрациите. Много често по оста си тялото има пробит отвор за отвеждане на охлаждаща течност в зоната на рязане и или за монтиране на антивибрационна система с която се демферира вибрациите при обработка с дълги инструменти. Демфериращия модул може да бъде изпълнен като маса-пружина или хидравлична система разположена вътре в инструмента.



Фиг. 1. Устройство на борщанга

Тези инструменти намират широко приложение в авиационната, автомобилната, енергийната и медицинската индустрия, където се изисква висока точност при обработка на сложни детайли от трудни за обработване материали като титан, хром-никелови сплави. Например, корпуси на двигатели, хидравлични цилиндри, елементи на турбини и хирургически импланти често се обработват чрез разстъргване с антивибрационни инструменти.

През последните десетилетия развитието на антивибрационните борщанги бележи значителен напредък благодарение на внедряването на нови материали, адаптивни демпфиращи механизми и сензорни технологии за следене на вибрациите в реално време. Това прави темата изключително актуална както от научна, така и от практическа гледна точка.

2. Изложение

Развитие на материалите използвани за тези инструменти и внедряване на нови технологии за намаляване на вибрации могат да се разделят на няколко етапа.

Първоначално, борщангите са били изработвани от въглеродна стомана, което ги прави податливи на вибрации и ограничавало тяхната ефективност.

През 20-ти век, с въвеждането на твърдосплавни материали и по-сложни геометрии на режещите инструменти, се постига значителен напредък в намаляването на вибрациите. Въпреки това, при обработката на дълбоки отвори, проблемът с динамичната нестабилност остава значим. Това води до разработването на специализирани антивибрационни борщанги, които включват демпфиращи технологии за абсорбиране на вибрациите.

Един от факторите, които оказват влияние върху демфериращите свойства е материалът на борщангата-при проектиране се прави компромис между коравина и демфериране. В съвременното машиностроене се използват твърдосплавни инструментални материали в комбинация с пасивна или активна система за демфериране.

През последните десетилетия, с развитието на материалознанието и технологиите за обработка, антивибрационните борщанги претърпяват значителни подобрения. Внедряването на нови материали като композити и разработки в областта на демпфиращите технологии позволяват създаването на инструменти с по-висока производителност и надеждност.

Често за изработване на телата на инструментите се използват легирани стомани с повишен модул на еластичност и коравина – напр. AISI 4340 [1], H13, 42CrMo4. Тези материали притежават добра устойчивост на динамични натоварвания и позволяват вграждане на демпфиращи елементи. Характеризират се с якост на опън в границите от 1000 до 1300 MPa, модул на еластичност около 210 GPa, ударна

якост над 35J, а чрез термична обработка и повърхностно уякчаване се подобрява устойчивостта на умора и резонансни натоварвания.

Таблица 1: Еволюция на материалите и демпфиращите технологии

Период	Използвани материали	Демпфиращи технологии
Началото на 20-ти век	Въглеродна стомана	Без специализирани технологии
Средата на 20-ти век	Твърдосплавни материали	Пасивни демпфери (гумени вложки)
Край 20-ти век	Композитни материали	Активни демпфери (маса-пружина)
21-ви век	Наноматериали и интелигентни сплави	Адаптивни демпфери със сензори

Твърдите сплави, съдържащи волфрамов карбид (WC), кобалт (Co) и титаниев карбид (TiC), те се използват широко за главите на борщангите или цели инструменти. Примери за индустриални марки включват Sandvik GC4335 [2], Kennametal KCU25 [3] и Mitsubishi VP15TF. Тези сплави се характеризират със следните физико-механични свойства: твърдост от 1400 до 1800 HV, модул на еластичност в порядък от 500 до 650 GPa, якост на огъване до 3000 MPa. Твърдите сплави притежават отлична изнosoустойчивост и топлинна устойчивост (>1000°C)

Тези материали са предпочитани заради комбинацията от твърдост и устойчивост при високи температури и натоварвания.

Последните години навлизат материали с многослойна структура – композити с матрица от полимер или метал и влакна от въглерод или стъкло. Примери за такова изпълнение може да намерим сред продуктите на водещи производители като: LMT Tools (тип VSMbars) [4] или Silent Tools на Sandvik Coromant. Конструкциите инструменти от този материал има сериозни предимства като: намалено тегло и инерция, високо вътрешно демпфиране, възможност за интегрирани демпфери вътре в структурата. Недостатък е по-високата цена и чувствителността към повреда от локални натоварвания.

Сплави с памет на формата (например NiTi)[5] позволяват адаптивна промяна на формата и твърдостта на борщангата в зависимост от вибрациите. Също така, нанопокрития като DLC (Diamond-Like Carbon) и TiAlN повишават устойчивостта на триене и

износване. Като пример за такива инструменти може да се разгледат инструменти с покрития от Oerlikon Balzers BALINIT® FUTURA NANO [6]. Те се характеризират с коефициент на триене < 0.3, температура на окисление >800°C твърдост над 3000 HV. В техниката сплавите с памет на формата (СПФ) са известни с еднопосочен и двупосочен ефект на памет на формата, ефект на модул на еластичност и висока вибрационна абсорбция. Еднопосочният ефект с памет на формата се изразява в голяма деформация в мартензитно състояние, достигаща до 8% при сплавите от Ni и Ti и до 5 0% при V O2 в последните проучвания[7]. Такива решения са подходящи за обработка при тежки условия и дълбоки отвори[8].

Друг аспект в развитието на разтъркващите борщанги е внедряването на нови технологии и похвати засягащи конструкцията на инструмента. Редица автори са разглеждали проблема с обработването на дълбоки отвори и са дали предложения за усъвършенстване на конструкцията на антивибрационните щанги.

Suyama et al. проучват как използването на различни материали и демпфиращи технологии в борщанги може да повиши стабилността и увеличи максималната дължина на излаз (overhang) при вътрешна обработка на закалена стомана. Проведено е разстъргване на отвори при различни дължини конзолност на захващането на инструмента от 4×D до 10×D. Остановява се че карбидните борщанги показват значително по-добра коравина и вибрационна устойчивост, което позволява работа при излаз от захвата на държача над 7×D. Борщангите с пълнеж от частици допълнително намаляват амплитудата на вибрациите, особено в зони, близки до границата на стабилност. Установено е, че комбинацията от висок модул на еластичност и демпфиране е ключова за увеличаване на обхвата на приложение на инструмента. Изследването доказва, че карбидните борщанги, особено в комбинация с пасивно демпфиране, могат да се използват ефективно при обработка на дълбоки отвори с висока точност. Авторите предлагат технология на действие на пълнежите с частици, базиран на вътрешно триене и разсейване на енергията чрез микроудари [9].

Zhang и съавтори (2020) разработват разстъргващ инструмент с композитна структура, включваща ограничен демпфиращ слой, вграден в тялото на борщангата. Изследването цели повишаване на стабилността и потискане на вибрациите чрез комбинация от лекота на композитния материал и високо вътрешно затихване на вложения демпфиращ

елемент. Чрез модален анализ и експериментално рязане авторите установяват, че естествената честота и статичната коравина на инструмента се увеличават значително. Резултатите показват, че в сравнение с обикновена стоманена борщанга, амплитудата на вибрациите е намалена с 34%, като се отчита и съществено подобрение в качеството на обработваната повърхност. Тази разработка подчертава потенциала на композитните и слоестите конструкции за приложение в високоточна вътрешна обработка[10].

Sortino et al. илюстрирал влиянието на материала и геометрията на борщангата, геометрията на режещия ръб, материала на обработваната повърхнина, режимите на рязане върху стабилността на процеса при разстръгване. Експерименталните резултати са показали, че стабилността на процеса зависи главно от съотношението на надвисване на борщангата към диаметъра[11].

В друго свое изследване Sortino et al. представил метод на хибриден динамичен модел за борщанга, базиран на емпирични модели. Моделът бил усъвършенстван експериментално чрез обработка с различни геометрии и материали. Получените прогнозни стойности съвпадат много добре с експерименталните – грешките за естествената честота са под 5%.. Моделът позволява предварително оценяване на поведението на нови конструкции без нужда от сложни FEM симулации. Изследването потвърждава, че структурни модификации, като използване на високодемпфиращи материали или хибридни структури, значително влияят на стабилността. На база изследването е предоставен лесно адаптивен модел, който може да бъде използван в индустриалния дизайн на борщанги. Модела обхваща както конвенционални, така и високодемпфиращи борщанги, което го прави ценен за широка гама от приложения [12].

Houck et al. създават настроена държач за борщанга, който действа като динамичен вибрационен абсорбер (DVA). Целта е да се повиши динамичната коравина и стабилността на системата при операции на вътрешна обработка. Създаден е държач със собствена маса и гъвкавост, който може да бъде настроен така, че неговата естествена честота да съвпадне с тази на борщангата. По този начин се получава двойна система с взаимодействие между основната структура (борщангата) и абсорбера (държача). Извършени са също така анализ на собствените честоти и амплитудно-резонансно поведение, Измерване на динамичната коравина на системата при различни настройки на държача,

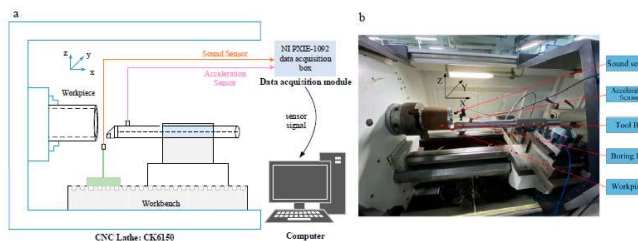
извършено е тестово разстръгване с и без DVA, при еднакви условия. Резултатите показват, че: при настройка на държача да резонира със системата, се наблюдава съществено увеличаване на ефективната коравина, е получена редукция на вибрации и повишаване на границата на стабилност, система демонстрира по-ниски амплитуди на колебания и по-високо качество на повърхносния слой на обработваната повърхност. [13].

В тази статия Miguelez et al. изследват начини за подобряване на стабилността при разстръгване чрез използване на пасивни вибрационни абсорбери (DVA – Dynamic Vibration Absorbers), интегрирани в борщанги. Цел на изследването е да се разработи механичен модел на система борщанга с вибрационен абсорбер, чрез който да се анализира влиянието на конструктивните и геометрични параметри върху границата на стабилност при обработка. За целта на изследването борщангата се моделира като конзолен лъч на Ойлер-Бернули, което се явява класически подход в теорията на огъването. Върху нея е монтиран пасивен абсорбер, представен чрез масово-пружинна система с настройваема честота и коефициент на затихване. След направената експериментална валидация се установява, че интегрирането на DVA води до значително разширяване на стабилната зона на работа, оптималните стойности за честотата на абсорбера съвпадат с резонансната честота на борщангата, при подходящ избор на параметри, амплитудата на вибрации се понижава с до 50%, а качеството на повърхността се подобрява[14].

Budak и Ozturk проучват влиянието на взаимодействието между успоредни инструменти, използвани едновременно при струговане, върху динамиката и стабилността на процеса. За постигане на целта е разработен динамичен модел, включващ две борщанги, свързани с обработвания детайл. Отчитат се еластични взаимодействия между инструментите чрез детайла. Моделът е сравнен със стандартен случай с единична борщанга. Проведени са експерименти при тестово разстръгване с една и с две борщанги и са снети амплитудите на вибрациите и грапавостта на повърхнините. Резултатите показват, че паралелното използване на две борщанги води до взаимно динамично взаимодействие, при което единият инструмент частично абсорбира вибрациите на другия. Това създава ефект на стабилизиране, който повишава границите на стабилност на процеса. При правилна синхронизация, амплитудата на трептения и "chatter" ефекти се редуцират. □ Авторите показват, че разстръгването с

паралелни инструменти може да бъде използвано не само за увеличаване на производителността, но и за подобряване на вибрационната стабилност. Предложен е нов подход към оптимизацията на обработка, който включва използването на множество инструменти за съвместна работа. Резултатите могат да се използват при CAD/CAM системи за симулации на устойчивостта при комплексни обработки [15].

В своя научен труд Lui Q (2023) и съавтори създават интелигентна система за мониторинг на вибрациите на борщанги по време на работа, използвайки дълбоко обучение (BiLSTM), която автоматично разпознава състоянията на вибрация (нормално, преходно, нестабилно). Направена е експериментална установка с борщанга, оборудвана със сензори за вибрации.



Фиг2. Експериментална схема

Проведени разстъргващи операции с различни режими, за да се получат данни при стабилно и нестабилно рязане. Използван е дълбок рекурентен невронен модел BiLSTM (Bidirectional Long Short-Term Memory) за обработка на времевите серии от сензора. За повишаване на обобщаващата способност е приложена техника за подредба на входните редове (Shuffle). Създаден е модел, който различава между три състояния: стабилна работа, преходна нестабилност, работа при силни вибрации. Системата разпознава състоянията с доверителна точност от 91.2% [16].

В изследване на Matsubara A и съавтори (2014) се представя метод за потискане на вибрациите в борщанги чрез използване на вградени пиезоелектрични актуатори, свързани към пасивен електрически LR кръг (индуктивност и съпротивление), функциониращ като демпфиращ елемент [17]. Системата е проектирана така, че пиезоелементите да се активират от деформациите на борщангата по време на рязане, като генерираната електрическа енергия се разсейва в LR веригата, което води до понижаване на механичните трептения. Чрез настройване на параметрите на електрическия кръг се постига максимално затихване при

съвпадение с естествената честота на системата. Експерименталните резултати показват, че при използване на този подход амплитудата на вибрациите се намалява с до 40%, а качеството на обработваната повърхност се подобрява значително. Методът представлява евтино и компактно решение, приложимо в индустриални условия, и е особено подходящ за приложения, където активното управление е технологично или икономически неприложимо.

Altintas и съавтори (2021) разработват интелигентна борщанга с автоматично настроен вибрационен абсорбер, проектирана да потиска трептенията при вътрешна обработка чрез самонастройващ се механизъм за динамично затихване [18]. Основният компонент на системата е настроен масов демпфер (TMD), интегриран в тялото на борщангата, който използва вградена сензорика за измерване на вибрации и автоматично настройва своята честота в реално време чрез безконтактен електромагнитен механизъм. Системата е валидирана експериментално чрез обработка на Inconel 718, при което се отчита значително намаляване на вибрационната амплитуда и разширяване на стабилната зона на рязане. Изследването показва, че автоматичната адаптация на абсорбера към модалните характеристики на борщангата е особено ефективна в условия на често променяща се геометрия и дълбочина на издаване, типични за авиационни и енергийни приложения. Тази технология представлява нов етап в развитието на саморегулиращи се антивибрационни инструменти.

Chiu и Chan (1997) представят цялостна система за активна компенсация на грешки при разстъргване, причинени от силите на рязане, чрез използване на борщанга с вграден пиезоелектричен актуатор [19]. Инструментът е проектиран така, че пиезоелементът да бъде разположен в критичната зона на огъване, като той получава команди от управляваща система, базирана на сензорна информация за деформации и вибрации по време на рязане. Чрез математическо моделиране на взаимодействието между силите на рязане и деформациите на инструмента е разработен адаптивен контролен алгоритъм, който минимизира отклоненията на върха на борщангата. Проведените експерименти показват, че системата е способна да компенсира до 70% от грешките в геометрията на отвора, предизвикани от радиални сили, особено при дълбоки и прецизни операции. Тази разработка бележи една от най-ранните успешни реализации на активно контролирани антивибрационни борщанги, демонстрирайки потенциала на

пиезоелектричната технология за реално подобрене на точността в производствени условия.

3. Заключение

Антивибрационните борщанги играят важна роля в съвременното машиностроене, като позволяват качествена обработка на дълбоки отвори при минимални вибрации. Чрез използване на съвременни материали, интеграция на сензори и активни демпфиращи системи, тези инструменти стават все по-интелигентни и производителни. Бъдещето на технологиите се крие в още по-висока адаптивност, вградени контролни алгоритми и нанотехнологии, които ще трансформират подхода към точната обработка променливи, тъй като факторите са количествени величини.

ЛИТЕРАТУРА

1. ASM International, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM International, 2002. ISBN: 978-0871703774.
2. Sandvik Coromant, "GC4335 Carbide Grades", 2023. [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com> (Accessed: January 3, 2025).
3. Kennametal, "KCU25 Turning Inserts", 2022. [Online]. Available: <https://www.kennametal.com> (Accessed: January 3, 2025).
4. LMT Tools, "VSMbar Composite Boring Bars", 2023. [Online]. Available: <https://www.lmt-tools.com> (Accessed: January 3, 2025).
5. Т. Тодоров, Р. Николов и Я. Ралев, "Експериментално изследване на сплави с памет на формата чрез специализиран стенд", Българско списание за инженерно проектиране, бр. 29, април 2016 г.
6. Oerlikon Balzers, "BALINIT® Coatings for Cutting Tools", 2024. [Online]. Available: <https://www.oerlikon.com/balzers> (Accessed: January 3, 2025).
7. Dynalloy Inc., www.dynalloy.com (Accessed: January 3, 2025).
8. D. C. Lagoudas, Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. Springer, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8>. (Accessed: January 3, 2025).
9. T. Suyama, N. Hara, T. Fujimura and H. Noguchi, "The use of carbide and particle-damped bars to increase tool overhang in the internal turning of hardened steel", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 79, no. 1–4, pp. 363–370, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8328-z> (Accessed: January 3, 2025).
10. J. Zhang, X. Zhao and S. Zhang, "Chatter and stability analysis of the slender composite boring bar with constrained damping layer", Applied Sciences, vol. 10, no. 13, p. 4537, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app10134537>. (Accessed: January 3, 2025).
11. M. Sortino, R. Ciancio and S. Modica, "Experimental analysis of the influence of tool holder materials and tool overhang on the stability of boring operations", International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 48, no. 3–4, pp. 394–400, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.004>. (Accessed: January 3, 2025).
12. M. Sortino, R. Ciancio and G. Totis, "A hybrid dynamic model for boring bar design", International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 50, no. 3, pp. 278–285, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.11.006>. (Accessed: January 3, 2025).
13. J. E. Houck, T. M. Lavin and R. G. Landers, "Analysis of the vibration characteristics of a boring bar with a variable stiffness dynamic vibration absorber", Advances in Mechanical Engineering, vol. 11, no. 1, pp. 1–11, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/1687814018820680>. (Accessed: January 3, 2025).
14. M. H. Miguélez, A. Soldani and A. Fernández-Vicente, "Improvement of chatter stability in boring operations with passive vibration absorbers", International Journal of Mechanical Sciences, vol. 52, no. 10, pp. 1376–1384, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2010.05.013>. (Accessed: January 3, 2025).
15. E. Budak and E. Ozturk, "Dynamics and stability of parallel turning operations", CIRP Annals, vol. 60, no. 1, pp. 383–386, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.028>. (Accessed: January 3, 2025).
16. Q. Liu, D. Li, J. Ma, Z. Bai and J. Liu, "Research on Intelligent Monitoring of Boring Bar Vibration State Based on Shuffle-BiLSTM", Sensors, vol. 23, p. 6123,

2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23136123>. (Accessed: January 3, 2025).
17. Matsubara, M. Maeda and I. Yamaji, "Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and LR circuit", *CIRP Annals*, vol. 63, no. 1, pp. 373–376, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.132>. (Accessed: January 3, 2025).
18. Y. Altintas, L. D. Lappin, D. van Zyl and D. Östling, "Automatically tuned boring bar system", *CIRP Annals*, vol. 70, no. 1, pp. 313–316, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.04.058>. (Accessed: January 3, 2025).
19. W. Chiu and K. W. Chan, "Design and testing of piezoelectric actuator-controlled boring bar for active compensation of cutting force induced errors", *International Journal of Production Economics*, vol. 51, no. 1–2, pp. 135–148, 1997. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(97\)00058-3](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00058-3). (Accessed: January 3, 2025).