

УДК 621.891:631.361.02

## До визначення параметрів процесів, що виникають в зоні зрізання коренеплодів цукрового буряка в стружку

І.А.Фабричнікова

Харківський національний технічний університет  
сільського господарства ім. П.Василенка (м. Харків, Україна)

Досліджується процес утворення бурякової стружки шляхом подрібнення цукрових буряків при виробництві цукру. Отримано рівняння рівноваги пластинки стружки, яка згинається зовнішніми силами. Встановлені розрахункові залежності для визначення зовнішньої сили, моменту пластини та радіусу кривизни стружки.

**Ключові слова:** процес, різання, коренеплід, стружка, подрібнення, ніж, пластина, тензор напруги, параметр

**Постановка проблеми.** Як відомо, виробництво бурякового цукру розпочинається з очищення і подрібнення коренеплодів цукрового буряку. І однією з найбільш вагомих складових підвищення якісних показників дифузійного процесу є одержання високоякісної бурякової стружки.

Тому дослідження процесу утворення стружки, розвиток теоретичних основ утворення бурякової стружки і розрахунок геометричних параметрів випереджуючої тріщини актуальні та мають важливе значення для народного господарства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показав, що поліпшення якості бурякової стружки сприяє більш повному вилученню цукру з цукросировини і, як наслідок, підвищенню рентабельності цукрового виробництва. Вирішенням проблеми отримання високоякісної бурякової стружки займалися такі провідні вчені як Хоменко М.Д., Сичевой П.С., Нечитайло В.М. та ін. Вони розробили комплекс технічних та технологічних вимог при дотриманні яких можливо одержати стружку високої якості. Найголовніші з них:

- комплекс заходів по запобіганню биття та травмування коренів цукрових буряків під час їх збирання, транспортування, збереження та подачі на переробку в цукровий завод;
- забезпечення максимального очищення коренеплодів цукрових буряків від піску, землі та механічних і рослинних домішок;
- висока якість ремонту бурякорізків і, як завершення комплексу, – висока якість підготовки до експлуатації бурякорізалних ножів [1].

Але саме процесу утворення бурякової стружки при подрібненні коренеплодів цукрових буряків приділялося мало уваги.

**Метою статті** є теоретичні дослідження процесу утворення високоякісної бурякової стружки при подрібненні коренеплодів цукрових буряків ножами з косим торцюванням.

**Виклад основного матеріалу.** При утворенні бурякової стружки остання деформується і в процесі різання набуває криволінійної форми. Будемо вважати стружку тонкою пластиною (тонкими прийнято вважати пластини з товщиною, малою в порівнянні з розмірами в двох інших напрямках). Самі деформації вважаються малими. В даному випадку критерієм малості деформації є малість зміщень точок пластинки в порівнянні з її товщиною. Обчислимо вільну енергію зігнутої пластинки.

При згинанні пластинки в деяких місцях всередині неї виникає напруга розтягування, а в інших – напруга стиснення. Саме на вигнутій стороні пластинки, очевидно, виникає розтягування (аж до утворення тріщин і розривів волокон), по мірі заглиблення в товщу пластинки це розтягування поступово зменшується, досягаючи в решті решт нуля, услід за чим в подальших шарах поступово збільшується стиснення.

Таким чином, усередині пластинки є нейтральна зона, на якій розтягування взагалі відсутнє, а по двох сторонах її деформація має протилежний знак. Ця нейтральна зона розміщена по середині товщини пластинки. Виробничий досвід цукровиків [2] підтверджує, що на вигнутій стороні іноді утворюються тріщини, які в деяких випадках приводять до розриву пластинки стружки.

Виберемо систему координат з початком в якійсь точці нейтральної поверхні  $X, Y$  та віссю  $Z$ , що направлена по нормалі до неї. Площина  $X, Y$  співпадає з площиною пластинки, що не деформується. Позначимо вертикальне зміщення точок нейтральної поверхні, тобто їх  $z$  – координату, літерою  $\zeta$  (рис. 1).

Що стосується компонент зміщення цих точок в площині  $X, Y$ , то вони є величинами другого порядку малості в порівнянні з  $\zeta$  і тому можуть бути прийняті рівними нулю. Таким чином, вектор зміщення точок нейтральної поверхні є

$$U_x^{(0)} = U_y^{(0)} = 0, \quad Z_z^{(0)} = \zeta(x, y),$$

де верхній індекс позначає, що компоненти відносяться до початку координат.

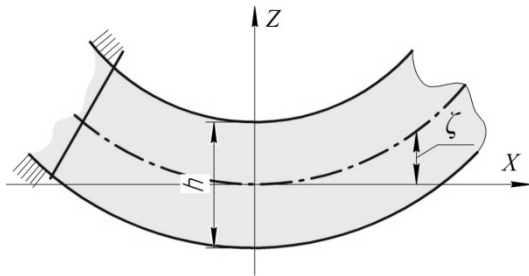


Рис. 1. Координати нейтральної зони

Оскільки пластина тонка, то, для того, щоб зігнути її, потрібно прикласти до її поверхні порівняно невеликі сили. Ці сили в будь-якому випадку викличуть менші напруження, ніж ті внутрішні напруження, що виникають всередині деформованої пластинки завдяки маючим в ній місцям напруженням розтягнення та стискання. Оскільки пластина ледь зігнута, то можна вважати, що вектор нормалі  $\vec{n}$  направлено по вісі  $Z$ . Таким чином, на обох поверхнях повинно бути

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zz} = 0, \quad (1)$$

де  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yz}$ ,  $\sigma_{zz}$  – компоненти тензора напруг.

Але оскільки товщина пластинки мала, то з рівності цих величин нулю на двох сторонах витікає, що вони малі і в середині неї. Таким чином, ми приходимо до висновку, що по всій пластинці компоненти  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yz}$ ,  $\sigma_{zz}$  малі в порівнянні з іншими компонентами тензора напруги. На цій підставі можемо покласти їх рівними нулю і визначити компоненти тензора деформації з цієї умови.

Згідно формулам теорії пружності маємо:

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1+\mu)} U_{xx}; \quad \sigma_{yy} = \frac{E}{(1+\mu)} U_{yy}, \quad (2)$$

$$\sigma_{zx} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)U_{zz} + \mu(U_{xx} + U_{yy})];$$

В силу рівняння (1) будемо мати:

$$U_{xx} = 0, \quad U_{yy} = 0, \quad (1-\mu)U_{zz} + \mu(U_{xx} + U_{yy}) = 0 \quad (3)$$

де  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Продиференціюємо в (3) перші дві умови та отримаємо:

$$\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} = 0,$$

тобто

$$\frac{\partial U_x}{\partial z} = -\frac{\partial U_z}{\partial x}, \quad \frac{\partial U_y}{\partial z} = -\frac{\partial U_z}{\partial y}.$$

Після інтегрування будемо мати:

$$U_x = -Z \frac{\partial U_z}{\partial x}, \quad U_y = -Z \frac{\partial U_z}{\partial y}.$$

Через малість деформації з достатнім ступенем точності замість  $U_z$  можна підставити  $\zeta(x, y)$  і тоді буде

$$U_x = -Z \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad U_y = -Z \frac{\partial \zeta}{\partial y}. \quad (4)$$

Опускаючи громіздкі перетворення, які включають обчислення варіації вільної енергії і варіації потенційної енергії пластинки, пов'язаної з наявністю зовнішніх сил, що діють, зрештою отримуємо рівняння рівноваги пластинки, яка згинається зовнішніми силами, що діють на неї:

$$\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \Delta^2 \zeta - F = 0, \quad (5)$$

де  $\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$  – жорсткість пластини при вигині;

$\Delta \zeta$  – оператор Лапласа;  $h$  – товщина пластинки;  $F$  – зовнішня сила.

Остаточно, враховуючи (5), матимемо для сили  $F$  і моменту  $M$  пластини:

$$F = -\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \left[ \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3} + \frac{\partial \theta}{\partial \ell} \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right], \quad (6)$$

$$M = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}, \quad (7)$$

де  $\theta$  – кут між нормаллю  $\vec{n}$  до нейтральної поверхні та віссю  $X$ ;  $\vec{\ell}$  – дотична до цієї поверхні.

При  $E = 6 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ,  $h = 0,04 \text{ м}$  та  $\mu = 0,46$  співвідношення (6) і (7) будуть

$$F = 50,6 \left[ \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3} + \frac{\partial \theta}{\partial \ell} \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right], \quad (6a)$$

$$M = 50,6 \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}. \quad (7a)$$

Враховуючи геометричні розміри леза пера бурякорізного ножа, обчислимо похідні. У першому наближенні форму стружки в області різання можна апроксимувати квадратною параболою  $\zeta = 0,33x^2$  тоді:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0,66x, \quad \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} = 0,66, \quad \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3} = 0. \quad (8)$$

Для обчислення  $[\partial \theta / \partial \ell]$  скористаємося відомими залежностями із диференціальної геометрії для радіусу кривизни кривої:

$$R = \frac{\left(1 + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}\right)^{3/2}}{\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}}, \quad K = \frac{1}{R} = \frac{\partial \theta}{\partial \ell}. \quad (9)$$

Підставляючи в (9) з (8), отримаємо

$$R = 2,87 \text{ м}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \ell} = 0,35 \frac{1}{\text{м}}.$$

Як свідчать дослідження [1] зменшення кута косою торцювання технологічно дає можливість суттєво поширити перехідну поверхню (фаску), зменшити кут загострення  $\beta$  та сприяє формуванню плавної поверхні жолобу сходу стружки.

Досвід виробників, проаналізований А.П. Адаменком [2] свідчить, що при переробці буряків зі значним забрудненням легкими домішками (гичка, бур'яни) за допомогою ножів з косим торцюванням можна отримати більш якісну стружку, ніж з прямим. Це пояснюється тим, що при формуванні стружки ножом з прямим торцюванням площина різання А-А (рис. 2, а) перпендикулярна тілу стружки і зусилля, що виникають при проникненні ножа в буряк, відгинають стружку одночасно у всьому перерізі, що сприяє утворенню тріщин та зламів на стружці.

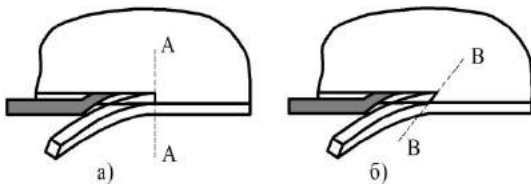


Рис. 2. Формування стружки ножами:

а) – з прямим торцюванням;

б) – з косим торцюванням

У ножів з косим торцюванням площина різання В-В (рис. 2, б) знаходиться під гострим кутом до тіла стружки, тому в той час, коли вершина пера ножа проникає в буряк, формуючи ребро стружки, її бокові сторони ще не відрізані і утримують стружку від вигину і формування на ній тріщин та зламів.

Потім у стружки відрізаються бокові сторони при сформованому ребрі, таким чином формування ребра стружки і її бокових сторін не співпадає в часі, а зусилля, що виникають на вершині пера ножа при формуванні ребра стружки, компенсуються ще не відрізнаними шарами буряку на бокових сторонах. Це створює сприятливі умови для отримання стружки з меншою кількістю і величиною тріщин та зламів.

Практичне застосування знаходять ножі з кутом торцювання  $70^\circ \dots 90^\circ$ .

Торцювання ножів під більш гострим кутом знижує міцність ріжучої частини і вона значно

сильніше пошкоджується сторонніми предметами, що потрапляють в бурякорізки. Тому косою торцювання ножів, в певній мірі, зменшує їх ресурс – занадто тонкий ніж втрачає свою міцність і чіткість форми ріжучої кромки, що призводить до погіршення якості стружки і суттєво збільшує втомне зношування ножа.

Проведені дослідження [3, 4] довели, що оптимальний кут торцювання ножів (особливо для 24-рамних бурякорізок)  $63^\circ \pm 2^\circ$  не тільки призводить до подовження ріжучої кромки, а ще дає можливість зменшити кут загострення ріжучої кромки до  $9^\circ \pm 1^\circ$ , сприяє утворенню плавного переходу від ріжучої кромки, фаски до жолобу сходу стружки. Все це мінімально травмує бурякову стружку, забезпечує її високу якість, гладкість поверхонь і зменшує витрати на тертя. Таке торцювання ножів дозволяє проявитись всім позитивним сторонам косою торцювання і, разом з тим, не сильно знижує міцність ріжучої частини.

**Висновок.** Таким чином, проведене дослідження процесу утворення бурякової стружки ножами з косим торцюванням, отримання рівняння рівноваги пластинки стружки, яка згинається зовнішніми силами, встановлення розрахункових залежностей для визначення зовнішньої сили, моменту пластини та радіусу кривизни стружки – черговий крок в розвитку теоретичних основ утворення високоякісної бурякової стружки і підвищення рентабельності цукрового виробництва.

### Література

1. Фабричнікова, І.А. Підвищення зносостійкості ножів для зрізання цукрових буряків у стружку конструктивними та технологічними засобами: автореф. дис. на здоб. ст. канд. техн. наук. [Текст] / І.А. Фабричнікова – Харків, 2013. – 20 с.

2. Адаменко, А.П. Отримання бурякової стружки. Узагальнення досвіду [Текст] / А.П. Адаменко. – К.: Національна асоціація цукровиків України УКРЦУКОР, 2002. – 32 с.

3. Фабричнікова, І.А. Дослідження впливу кута торцювання на зносостійкість бурякорізальних ножів [Текст] / І.А. Фабричнікова. – Харків: Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка «Механізація сільськогосподарського виробництва», 2014. Вип. 148. – С. 412-418.

4. Фабричнікова, І.А. Оптимальні геометричні параметри заточки бурякорізальних ножів [Текст] / І.А. Фабричнікова. – Харків: Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка «Проблеми технічного сервісу сільськогосподарської техніки», 2009. Вип. 76. – С. 293 - 297.

**Аннотация**

**К определению параметров процессов возникающих  
в зоне изрезания корнеплодов сахарной свеклы в стружку**

**И.А.Фабричникова**

*Исследуется процесс образования свекловичной стружки путём измельчения сахарной свеклы при производстве сахара. Получено уравнение равновесия пластины стружки, изгибаемой внешними силами. Установлены расчётные зависимости для определения внешней силы, момента пластины и радиуса кривизны стружки.*

**Ключевые слова:** процесс, резание, корнеплод, стружка, измельчение, нож, пластина, тензор напряжения, параметр

**Abstract**

**To the definition of the parameters of processes occurring  
in the area of grinding sugar beet roots in chips**

**I.A.Fabrichnikova**

*We investigate the formation of beet chips by grinding sugar beet in sugar production. An equation of balance plate of chip, bent by external forces. Established dependence of the calculated external force, since the radius of curvature of the plate and of chip.*

**Keywords:** process, cutting, root vegetable, chips, milling, knife, plate, the stress tensor, the parameter

---

**Представлено: В.И.Мельник / Presented by: V.I.Mel'nik**

**Рецензент: И.Г.Бойко / Reviewer: I.G.Bojko**

*Подано до редакції / Received: 09.12.2014*