

Оценка механических свойств костной ткани методом микротвердости

Т. В. ЧИЖИКОВА, И. А. РОГОВ, И. Л. ПОПОВ

Московский технологический институт мясной и молочной промышленности, г. Москва, СССР.

На качественную характеристику измельчаемости материалов большое влияние оказывают их физико-механические свойства. Одним из методов, применяемых для оценки этих свойств, является метод измерения микротвердости, основанный на принципе вдавливания алмазной пирамиды при незначительных нагрузках от 2 до 500гс. После снятия нагрузки измеряют диагональ отпечатка (рис. I) и подсчитывают число твердости (Н) по формуле:

$$H = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2},$$

где P — нагрузка, кгс;  $\alpha$  — угол при вершине алмазной пирамиды, равный  $136^\circ$ ; d — среднее арифметическое значение диагоналей отпечатка, мм.

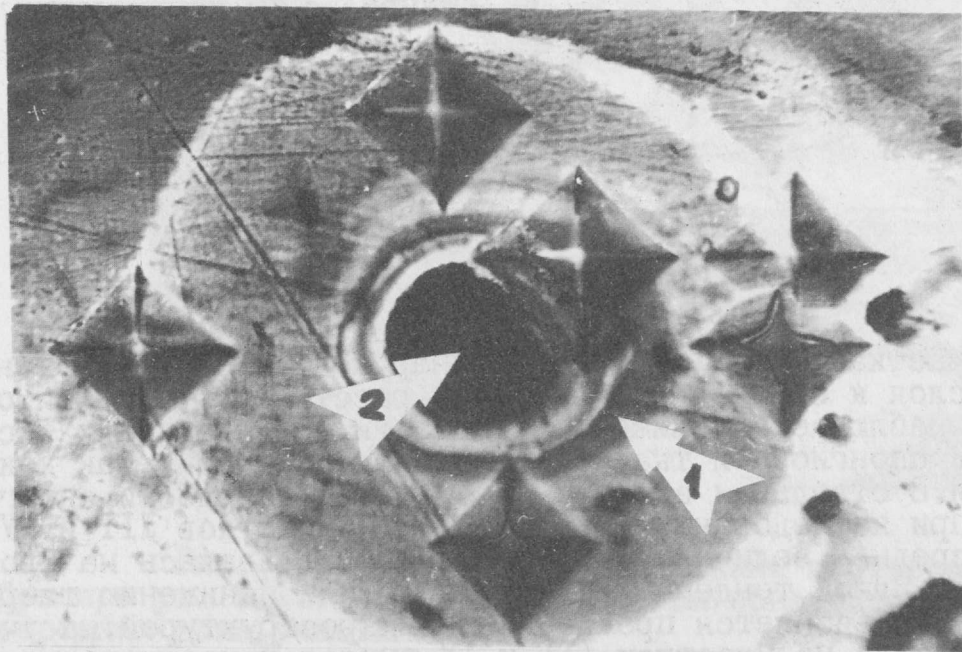


Рис. I. Отпечатки твердости на структурных элементах компактной ткани ребра при ув. x890:  
1 — остеоон, 2 — гаверсов канал.

Объектом исследования служили опиленные ребра крупного рогатого скота, отобранные в соответствии с возрастом и весом животного.

По специально разработанной методике измеряли микротвердость по толщине компактной ткани в поперечном сечении ребра на участках I, II, III, IV (рис. 2). Выборочно микротвердость измеряли на боковых поверхностях образцов (У). Величины значений микротвердости остеонов и прилегающих к ним других структурных составляющих не дали существенных различий, но позволили установить повышенную хрупкость у краев гаверсова канала. На рис. 1 отчетливо видно, что при нанесении отпечатка края гаверсова канала покрываются сеткой мельчайших трещин.

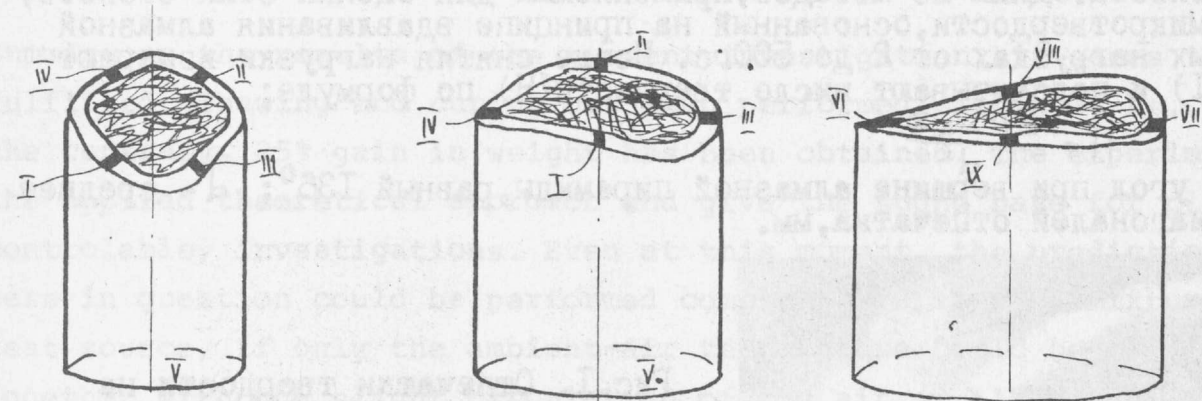


Рис. 2. Общий вид образцов, взятых из различных зон ребра, для определения микротвердости: а) — из позвоночной зоны; б) — из средней зоны; в) — из грудной зоны.

При исследовании микротвердости на участках I и II (рис. 2а) обнаружена отчетливая тенденция повышения твердости от наружного слоя к средней его части на расстоянии 2мм при общей толщине компактной ткани 3-4 мм. Далее наблюдается снижение твердости в направлении к спонгиозной ткани. Измерить точно твердость спонгиозной ткани весьма затруднительно, так как под действием индентора она раскрашивается. В отдельных экспериментах число твердости спонгиозной ткани не превышало 12-13 кгс/мм<sup>2</sup>. При исследовании микротвердости участков III и IV отмечен заметный разброс данных, но в среднем величина микротвердости оставалась на уровне значений, полученных для участков I и II. Явной тенденции к повышению или понижению твердости не обнаружено. Отмеченный разброс данных объясняется прежде всего микроструктурой: на участках I и II она более плотная и однородная, а на участках III и IV — рыхлая и неоднородная, толщина компактной ткани на последних значительно меньше (~ на 50-60%). В средней зоне ребра

отмечена существенно более низкая твердость, примерно в два раза, сравнительно с позвоночной зоной. Микротвердость в грудной зоне была измерена только на участках УІІІ и ІХ; участки УІ и УІІ имели весьма незначительную толщину компактной ткани (~ I мм и менее), в их микроструктуре выявлялись хрящеподобные области, несплошности и пр. Измерить микротвердость на этих участках не представилось возможным вследствие того, что компактная ткань не выдерживала давление индентора даже при малых нагрузках. Отпечатки микротвердости были расплывчатыми, деформированными и непостоянными по величине. Аналогичная картина отмечена в переходной области от компактной ткани к спонгиозной. На рис. 3а, б, в, г) показаны отпечатки и числа микротвердости на компактной ткани с выходом на спонгиозную ткань.

Характер изменения микротвердости по ширине компактной ткани различен в зависимости от того, с какой стороны ребра - выпуклой (наружной или латеральной) или вогнутой (внутренней или медиальной) - производили измерения. Так выпуклая сторона ребра имела более плотную и однородную по структуре компактную ткань и в этом случае отмечена тенденция к повышению твердости от наружного слоя к среднему (рис. 3а, б). Вогнутая сторона ребра имела повышенное количество несплошностей и в этом случае отмечена тенденция к снижению твердости от наружного слоя к среднему (рис. 3в, г).

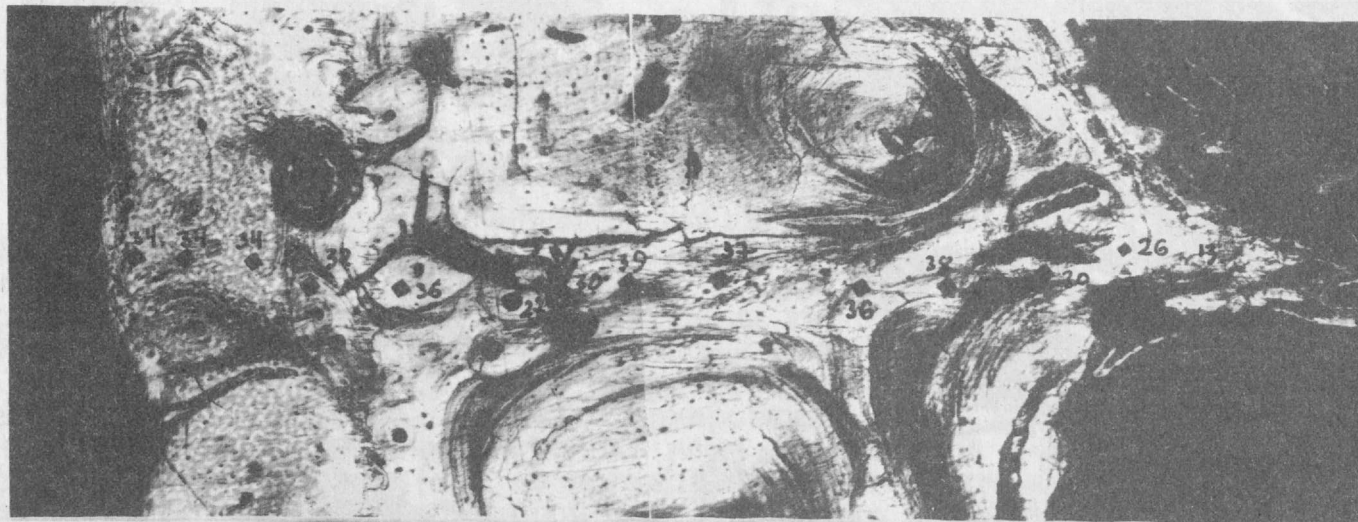
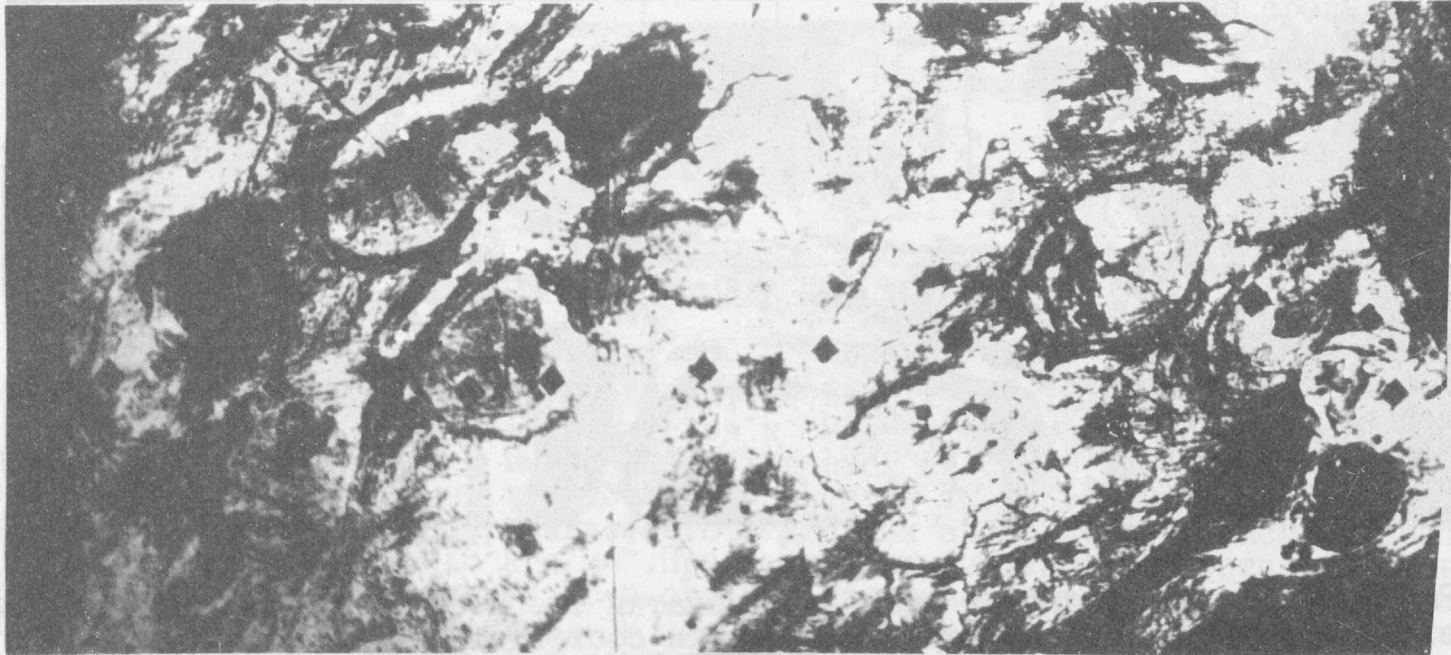
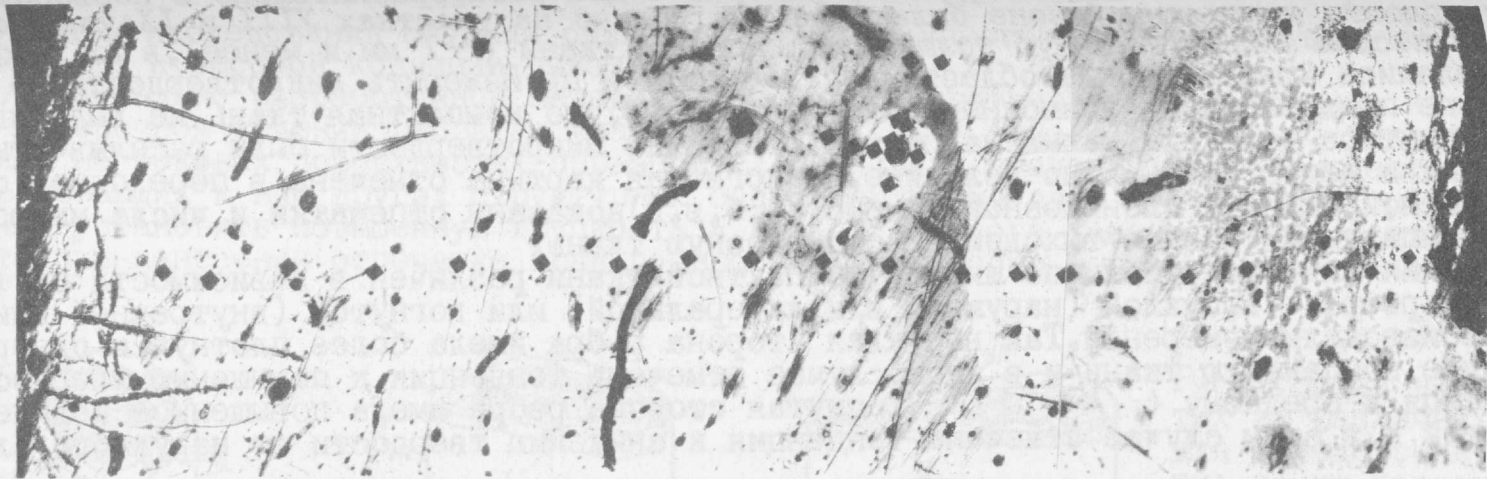
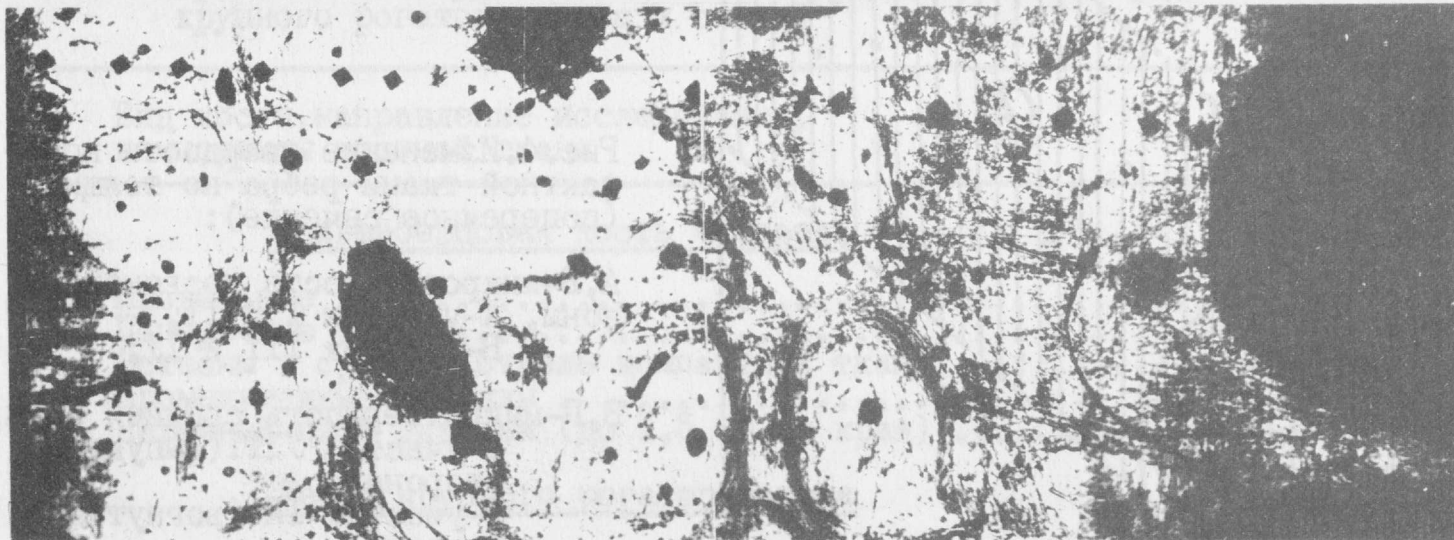


Рис. 3. Строение компактной ткани и отпечатки твердости в поперечном сечении ребра при ув. x115: а, б, в) - позвоночная зона, участки соответственно I, II, III и IV; г) - средняя зона, участки I-II.



Продолжение рис.3.



Окончание рис.3.

(рис.4)

Полученный характер распределения твердости по длине ребра, толщине и ширине компактной ткани может быть обоснован биологическими особенностями организма животного и функциональным назначением ребра.

Анализ корреляции между твердостью и прочностными характеристиками реберной кости показал, что положительная корреляция имеется с пределом прочности на сжатие ( $r_c = 0,38$ ). Это значение дает основание полагать, что число твердости для костной ткани является характеристикой, указывающей на способность кости к деформированию.

Числовые значения микротвердости, полученные нами и имеющиеся в литературных источниках, хорошо согласуются и имеют один и тот же порядок. Ниже в таблице выборочно приведены для сравнения числа твердости большеберцовой кости человека и ребра крупного рогатого скота и свиней.

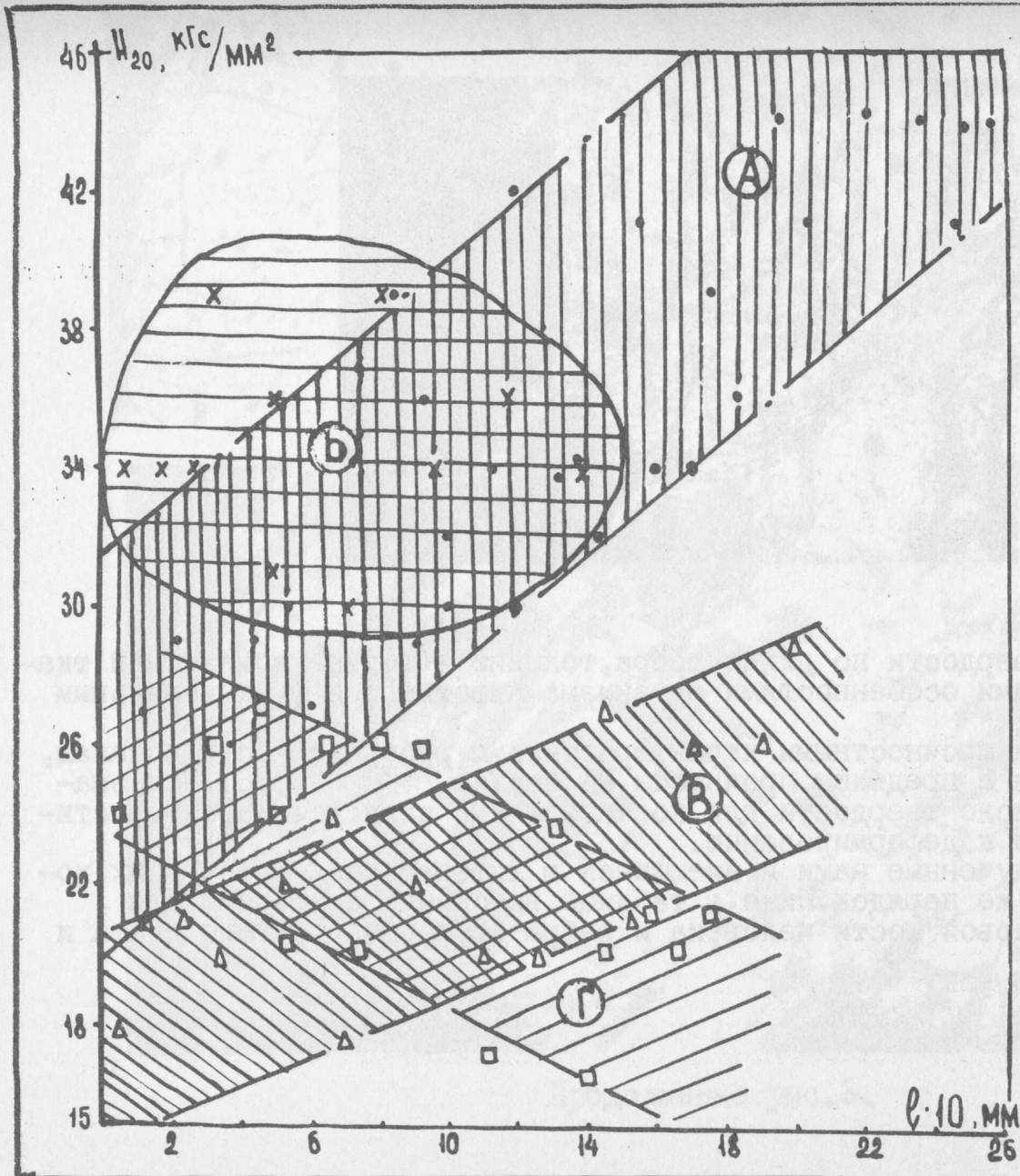


Рис. 4. Изменение твердости компактной ткани ребра по толщине (поперечное сечение):

А, Б-микротвердость позвоночной зоны, А-участок I и II, Б-участок III и IV;

В, Г-микротвердость средней зоны, В-участок VIII (выпуклая сторона), Г-участок IX (вогнутая сторона).

## Сравнительные данные значений твердости большеберцовой кости человека и ребра крупного рогатого скота и свиней

Вид кости, направление исследования, компоненты костной ткани	! Число твердости, ! кгс/мм <sup>2</sup>
--	---

Большеберцовая кость человека

Продольное .....	47,8
Поперечное .....	от 7 до 32,7
Остеоны в среднем отделе компактной ткани .....	33,6 - 41,1
Промежуточные ламеллы .....	43 - 48
Наружный слой диафиза (до 1,5 мм от края) .....	70

Ребро крупного рогатого скота

Продольное .....	48
Поперечное .....	от 5 до 29
Остеоны в среднем отделе компактной ткани .....	28 - 49
Промежуточные ламеллы .....	32 - 47
Наружный слой ребра (от 0,03 до 1,6 мм от края) .....	18 - 36
Средний слой ребра .....	28 - 58
Внутренний слой ребра .....	12 - 26
Пластины трабеулл на переходе компактной ткани в спонгиозную .....	5 - 20

Ребро свиней

Продольное .....	28,3
Поперечное .....	от 3 до 19
Остеоны в среднем отделе компактной ткани .....	10-23
Промежуточные ламеллы .....	23 - 32
Наружный слой ребра (0,03 + 1 мм от края) .....	9 - 19

Выводы

1. Впервые применен метод измерения микротвердости для оценки механических свойств отдельных структурных составляющих костной ткани ребра. Проведенные исследования свидетельствуют о высокой неоднородности строения и твердости ребра как по сечению, так и по его длине.
2. Установлено, что наибольшей твердостью обладает ребро в позвоночной зоне и менее всего в грудной зоне. Твердость в поперечном сечении ребра по толщине компактной ткани повышается от наружного слоя к среднему, а затем имеет место снижение в направлении к спонгиозной ткани.
3. Полученные сведения учитывали при изучении особенностей изменения таких характеристик механических свойств, как ударная вязкость и напряжение при изгибе, а также при аналитическом исследовании и выводе комплексного показателя, характеризующего процесс измельчения кости.

Литература

1. Weaver G. The microscopic hardness of bone. - *J. Bone Joint Surg.*, 1966, vol. 48A, p. 275-288
2. Кнетс И. В., Пфафрод Г. О., Саулгозис Ю. Ж. Деформирование и разрушение твердых биологических тканей. Рига, Зинатне, 1980, 319 с.
3. Александер Р. Биомеханика: перевод с английского Ю. И. Лашкевича, под ред. В. С. Гурфинкеля. - М.: Мир, 1970, 339 с.
4. Чижикова Т. В. Машины для измельчения мяса и мясных продуктов. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982, 302 с.