

Verteilung der im Walzgut hervorgerufenen Spannungen beim Breitenabnahmenprozeß der Brammen

von

Jun-ichi KOKADO*, Natsuo HATTA*, Hirohiko TAKUDA*, Takao KAWANAMI**,
Kazuo WATANABE** und Shiro ICHIKAWA**

(Eingegangen am 18. Dezember 1984)

Inhaltsangabe

In dieser Arbeit wurde ein Modellversuch über die bei der Breitenabnahme im Walzgut entstehende Spannung anhand der Plasticine-Platten und gleichzeitig eine rechnerische Untersuchung darüber mit dem Finite-Elemente-Verfahren durchgeführt.

Die berechneten Werte der Spannungen stimmten mit den gemessenen Werten im ganzen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ gut überein. Daraus erklärte sich, wie die Walzbedingungen auf die Spannungsverteilung im Walzgut wirken, und gewonnene wichtige Kenntnis ist wie folgende:

Beim Vertikalwalzen und auch beim nachfolgend durchgeführten Horizontalwalzen entsteht im allgemeinen eine Druckspannung, und ihre Größe ist am größten an den Breitenseiten der Bramme. Aber die Spannung in der Walzrichtung wendet sich mit Näherung zur Breitenmitte von Druckspannung zu Zugspannung. Dies bedeutet, daß die im Strangguß unerwartet in der Umgebung der Breitenmitte der Bramme erscheinenden Innenrisse durch die beim Walzen dort entstehende Zugspannung vergrößert werden können. Daher sollte die Entstehung von Innenrissen beim Stranggießverfahren völlig zurückgehalten werden.

1. Einleitung

Beim Breitenabnahmenprozeß der Brammen ist es eine wichtige Frage, ob die durch das Walzen im Walzgut hervorgerufenen Spannungen Flächen- und Innenrisse der stranggegossenen Brammen erweitern können. Daher soll es vor der praktischen Anwendung dieses Prozesses genug untersucht werden, wo und wie groß die Spannungen im Walzgut entstehen und wie die Walzbedingungen auf die Verteilung der Spannungen wirken.

In dieser Arbeit werden diese Fragen durch das Modellversuch anhand der Plasticine-Platten und auch durch die analytische Berechnung mit dem strplastischen Finite-Elemente-Verfahren untersucht.

** Nippon Steel Corporation

2. Versuchs- und Berechnungsverfahren

2.1. Versuchsmethode

Als Modellversuch wurden Plasticine-Platten mit einer Breite von 190mm und mit einer Dicke von 28mm durch die Vertikal- und Horizontalwalze gewalzt. Diese Größe entspricht etwa 1/10 von der praktisch stranggegossenen Brammen. Als Vertikalwalze wurden eine Flachwalze und drei verschiedene Kaliberwalzen mit einem Durchmesser von 120mm und mit einer Drehzahl von 3,75 r. p. m. benutzt.

Bild 1 zeigt die Form der Kaliberwalzen und ihre Größe. Wie das Bild zeigt, haben die Kaliberwalzen je einen Kaliberwinkel von $7,6^\circ$ (Form I), $14,9^\circ$ (Form II) und $21,8^\circ$ (Form III) (je eine Neigung der Kaliberwand von 13,3%, 26,6% und 40,0%).

Das Walzgut mit rechteckigem Querschnitt wurde zuerst mit einer Breitenabnahme von 15mm (Breitenabnahmenverhältnis von 7,9%) und dann weiter mit einer Breitenabnahme von 15mm (8,6%) durch die gleichartige Vertikalwalze gewalzt. Das dadurch gewonnene hundeknochenförmige Walzgut wurde durch die Flachwalze bis zur Anfangdicke von 28mm horizontalgewalzt. Die Normalspannungen in Breiten-, Walz- (Längs-) und Dickenrichtung des Walzgutes, σ_w , σ_L und σ_H , wurden anhand der Drucksensoren mit einem Durchmesser von 6mm und einer Dicke von 0,6mm gemessen. Dabei wurden die Sensoren an drei Stellen, je 7mm, 15mm und 35mm von dem Breitenende der Probe entfernt, und auch in der Breitenmitte vorher begraben, wie sie in **Bild 2** wiedergegeben sind. Um die begrabenen Stellen und Richtungen genau zu halten, wurden die Drucksensoren vor jedem Walzen neu begraben. Es wurde im Vorversuch festgestellt, daß der Drucksensor auch auf eine Zugspannung, die kleiner ist als etwa 1 kgf/cm^2 , sicher antworten kann, aber daß in diesem Fall die quantitative Zuverlässigkeit niedrig ist. Die Temperatur des Walzgutes war immer auf 20°C gehalten.

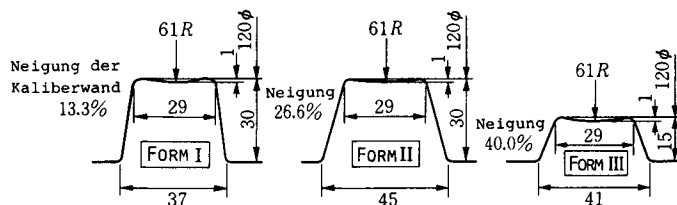


Bild. 1 Profil von drei kaliberwalzen

2.2. Rechnerische Methode

Die rechnerische Methode mit starr-plastischen finiten Elementen ist in Schritten 1), 2), 3) und 4) eingehend dargestellt. Die für die Rechnung erforderliche Fließspannung von Plasticine wird nach Chijiwa et al.⁵⁾ durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\sigma = 1.15 \times 10^{-5} \varepsilon^{0.085} \dot{\varepsilon}^{0.12} \exp\left(\frac{3530}{T}\right) \quad \text{in kgf/cm}^2$$

$$T = 253 \sim 323 \text{K}, \varepsilon = 0.02 \sim 0.3, \dot{\varepsilon} = 0.10^{-2} \sim 10^0 \text{1/s.}$$

Darin ist T die absolute Temperatur. Unter bestimmten Walzbedingungen überschreitet die Vergleichsdehnung ε den Anwendungsbereich der Gleichung ein wenig. Es wurde angenommen, daß auch in diesem Fall die Gleichung doch noch gültig ist. Die Reibungskoeffizient zwischen Walze und Plasticine wurde um 0,45 angenommen.

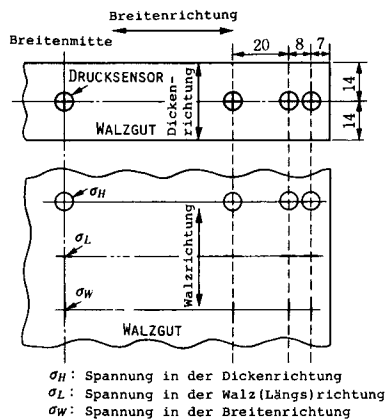


Bild. 2 Stellen und Richtungen der Drucksensoren im Walzgut

3. Experimentelle und berechnete Ergebnisse

3.1. Spannungsverteilung während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze

Bild 3 (a) und (b) zeigen die Abläufe der gemessenen Spannungen in Breiten-, Walz- (Längs-) und Dickenrichtung des Walzgutes, σ_w , σ_L und σ_H , während des ersten Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form I und von Form II. In diesen Bildern sind die Druckspannungen positiv angegeben. Mit der Entfernung von dem Breitenende verkleinert sich der Wert jeder Spannung, aber damit breitet sich der Einflußbereich der Spannungen aus. Die Spannungen im Walzgut sind großenteils Druckspannungen.

Aber die Längsspannung σ_L in der Umgebung der Breitenmitte und die Dicken-spannung σ_H vor dem Walzspalt an der um 15 mm von dem Breitenende entfernten Stelle sind Zugspannungen. Der Wert der Druckspannung von σ_L verkleinert sich einmal in der Mitte des Walzspaltes. Die maximale Druckspannung entsteht an der Eingangsseite des Walzspaltes wie sie beim Dickplattenwalzen.

Bild 4 zeigt die nach dem starr-plastischen Finite-Elemente-Verfahren

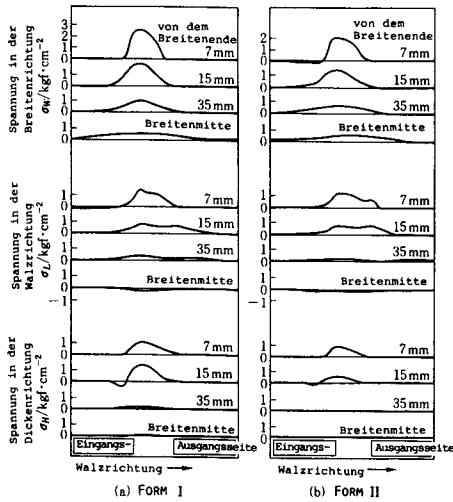


Bild. 3 Experimentelle Ergebnisse über die Änderung von drei Normalspannungen während des ersten Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form I und II

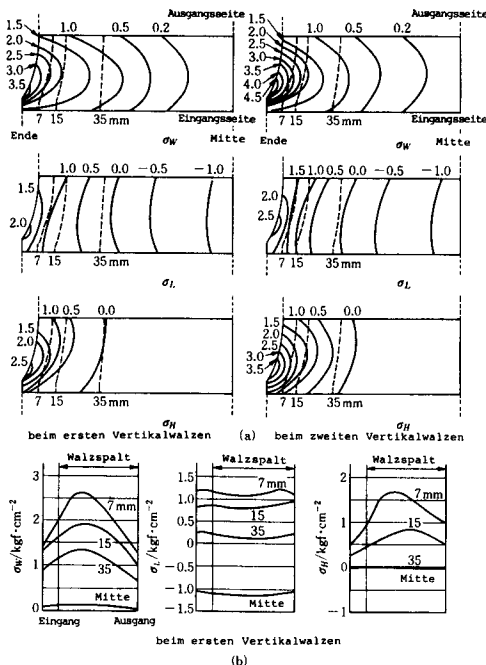


Bild. 4 Berechnete Ergebnisse über die Verteilung der Spannungen im Walzgut während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form II

berechneten Ergebnisse über die Verteilung der Spannungen im Walzgut während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form II. Und zwar zeigt das Bild 4 (a) die Spannungsverteilung im L. W. Querschnitt beim ersten Vertikalwalzen, wodurch die Breite des Walzgutes von 190mm zu 175mm abgenommen wird, und die beim zweiten Vertikalwalzen, wodurch die Breite von 175mm zu 160mm abgenommen wird. Die gestrichelten Linien im Bild zeigen die Fließlinien der Punkte, wo die Drucksensoren begraben sind. Das Bild 4 (b) zeigt den Ablauf der Spannungen während des ersten Vertikalwalzens an den gemessenen Punkten, der den Fließlinien entlang erworben wird.

Die Verteilung der σ_w und der σ_H verhalten sich miteinander ähnlich, und beide zeigen eine sogenannte muschelförmige Gestalt im Bild (a) und eine konvexförmige Kurve im Bild (b). Die Verteilung der σ_L verhält sich aber anders als die von σ_w und σ_H und zeigt eine konkavförmige Kurve im Bild (b). Ferner wird die Längsspannung σ_L in der Umgebung der Breitenmitte eine verhältnismäßig große Zugspannung. Diese Ergebnisse stimmen mit den im Bild 3 gezeigten gemessenen Ergebnissen im ganzen gut überein. Vergleicht man die beiden Darstellungen der Spannungsverteilung im Bild 4 (a) miteinander, kann man es leicht ver-

stehen, daß die Werte der Spannungen bei zweiten Vertikalwalzen im ganzen größer sind als die beim ersten.

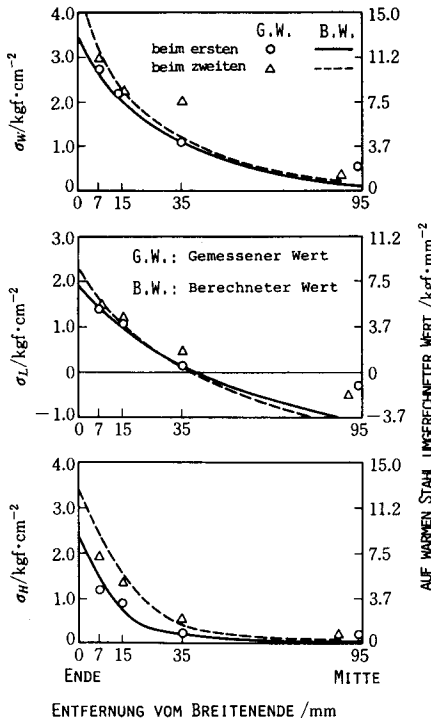


Bild. 5 Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen über die maximalen Spannungen während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form II

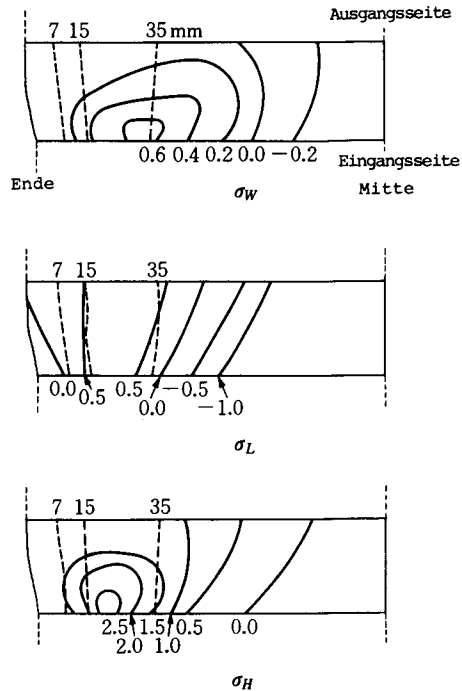


Bild. 6 Berechnete Ergebnisse über die Spannungsverteilung während des Horizontalwalzens während des Vertikalwalzens nach dem Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form II

Bild 5 zeigt die gemessenen und berechneten Ergebnisse über die maximale Spannungsverteilung in der Breitenrichtung während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form II und die gute Übereinstimmung von beiden Werten. Jede Spannung ist am Breitenende am größten und wird umso kleiner, je näher sie zur Breitenmitte kommt. In diesem Fall ist es beachtlich, daß die Spannung σ_L eine Zugspannung wird, wo die Entfernung von dem Breitenende größer ist als ungefähr 40mm, und daß die Größe der Zugspannung in der Breitenmitte nach dem berechneten Ergebnis nicht außerachtgelassen werden kann. Daß die gemessenen Werte der Zugspannung in der Breitenmitte etwas kleiner sind als die berechneten Werte, kann man damit begründen, daß bei der Zugspannung der Drucksensor eine schlechtere Zuverlässigkeit hat als bei der Druckspannung. Die rechte Vertikalachse des Bilds zeigt den auf warmen Stahl umgerechneten Werte unter Annahme, daß die

Fließspannung von $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ beim Plasticine der Fließspannung von $3,7 \text{ kgf/mm}^2$ beim warmen Stahl entspricht.

3. 2. Spannungsverteilung während des Horizontalwalzens des hundeknochenförmigen Walzgutes

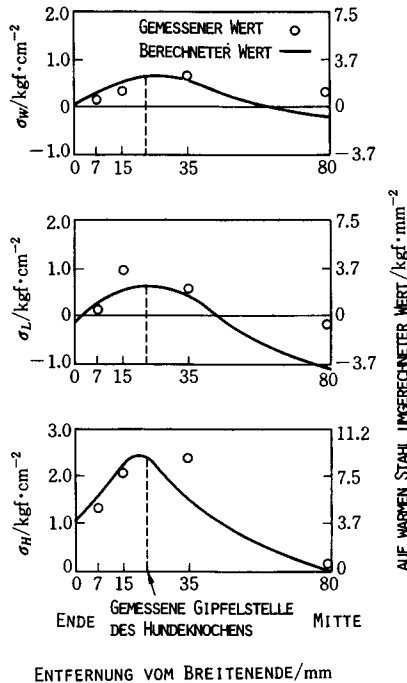


Bild. 7 Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen über die maximalen Spannungen während des Horizontalwalzens nach dem Vertikalwalzen mit Form II

σ_L eine Zugspannung. Es ist zu beachten, daß eine verhältnismäßig große Zugspannung nicht nur beim Vertikalwalzen entsteht, sondern auch beim Horizontalwalzen in der Umgebung der Breitenmitte des Walzgutes. Infolgedessen sollten die Brammen beim Stranggießverfahren so gegossen werden, daß sie nicht nur auf ihre Oberfläche sondern auch in ihrem Innern keinen Fehler haben, um die Vergrößerung des Fehlers durch die beim Vertikal- und Horizontalwalzen hervorgerufene Zugspannung zu vermeiden.

Bild 7 zeigt die gemessenen und berechneten Ergebnisse über die maximale Spannungsverteilung in der Breitenrichtung beim Horizontalwalzen. Außer der Spannungen von σ_L und von σ_w in der Breitenmitte stimmen die berechneten Werte mit den gemessenen Werten sehr gut überein. Das Bild zeigt auch, daß am Breiten-

Das durch die zweimal durchgeführten Vertikalwalzen je mit einer Breitenabnahme von 15mm gewonnene hundeknochenförmige Walzgut wurde bis zu seiner Anfangdicke horizontalgewalzt.

Bild 6 zeigt die Verteilung von drei berechneten Normalspannungen im L.W-Querschnitt beim Horizontalwalzen, das nach dem Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form II durchgeführt wurde. Die Verhalten der Verteilung der σ_w und der σ_H zeigen eine ähnliche Figur, obwohl die Größen der Spannungen unterschiedlich sind. Die maximale Druckspannung der σ_H entsteht an der Gipfelstelle des Hundeknochens, aber die der σ_w verschiebt sich etwas zur Breitenmitte. In der Umgebung der Breitenmitte werden die Spannungen von σ_w und insbesondere von

AUF WARME STAHL UMGERECHNETER WERT / $\text{kgf}\cdot\text{mm}^{-2}$

ende die Spannung von σ_L eine kleine Zugspannung wird. Dies bedeutet, daß an der Brammenkante manchmal entstehende Risse durch die Zugspannung entwickelt werden können. Die rechte Vertikalachse im Bild zeigt den auf warmen Stahl umgerechneten Wert wie die im Bild 5.

3. 3. Einfluß der Form der Vertikalwalze auf die Spannungsverteilung

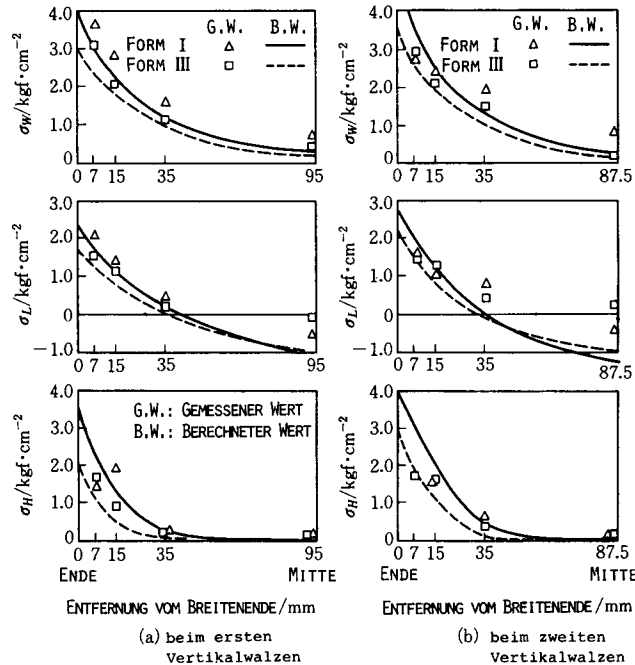


Bild. 8 Verteilung der maximalen Spannungen beim Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I und III

Bild 8 zeigt die gemessenen und berechneten Ergebnisse über die Verteilung der maximalen Normalspannungen in der Breitenrichtung beim Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I und von Form III. Jede Spannung bei der Vertikalwalze mit einem Kaliberwinkel von $7,6^\circ$ (Form I) ist größer als bei der Kaliberwalze mit einem Kaliberwinkel von $21,8^\circ$ (Form III), und der Unterschied dazwischen wird umso geringer, je näher es zur Breitenmitte kommt. Die berechneten Werte sind dabei ein wenig kleiner als die gemessenen Werte, aber die beiden stimmen miteinander im ganzen gut überein. Daß es in der Breitenmitte einen gewissen Unterschied zwischen den berechneten und gemessenen Werten der Spannung σ_L gibt, kann von der Meßunsicherheit des Sensors bei der Zugspannung abhängen. Die Spannungen beim zweiten Vertikalwalzen werden etwas größer als die beim ersten

Vertikalwalzen, aber die Verhalten der Spannungsverteilung sind miteinander ähnlich.

Bild 9 zeigt die maximale Spannungsverteilung in der Breitenrichtung beim Vertikalwalzen mit Flachwalze im Vergleich mit der beim Vertikalwalzen mit Kaliberwalze. Die Spannungen bei der Flachwalze sind im ganzen kleiner als sie bei der Kaliberwalze, besonders am Breitenende. Das Verhalten der Spannungsverteilung bei der Flachwalze ist aber grundsätzlich gleich mit dem bei der Kaliberwalze.

Bild 10 zeigt die berechnete Spannungsverteilung im L.W-Querschnitt beim ersten Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I, Kaliberwalze von Form III und Flachwalze. Im Vergleich der in Bild 10 und in Bild 4 dargestellten Spannungen miteinander wird es klar, daß die Spannungen beim Vertikalwalzen bei der Flachwalze am kleinsten sind, und daß mit abnehmendem Kaliberwinkel die Spannungen immer größer werden und der Wirkungsbereich der Breitenabnahme immer mehr in die Breitenmitte kommt.

Bild 11 zeigt die gemessenen und berechneten Ergebnisse über die maximale Spannungsverteilung in der Breitenrichtung beim Horizontalwalzen nach den zweimaligen Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I und III. Aus diesem Bild und dem Bild 7 kann man leicht verstehen, daß sich die Gipfelstelle jeder Spannungsverteilung mit abnehmendem Kaliberwinkel der Vertikalwalze zur Breitenmitte verschiebt. Dies bedeutet, daß sich die Formänderung beim Vertikalwalzen mit abnehmendem Kaliberwinkel zur Breitenmitte mehr ausbreitet. Die Form der Vertikalwalze hat einen Einfluß auf die Zugspannung am Breitenende, und zwar verkleinert sich die Zugspannung von σ_L am Breitenende mit zunehmendem Kaliberwinkel.

3. 4. Einfluß der Größe der Breitenabnahme auf die Spannungsverteilung

Um den Einfluß der Größe der Breitenabnahme auf die Spannungsverteilung beim Vertikalwalzen zu untersuchen, wurde das Walzgut mit einer Breite von 190 mm und einer Dicke von 28mm anhand der Kaliberwalze von Form III mit drei verschiedenen Breitenabnahmen von 5mm, 10mm und 15mm vertikalgewalzt.

Bild 12 zeigt die unter diesen Walzbedingungen berechneten und gemessenen Ergebnisse über die maximale Spannungsverteilung in der Breitenrichtung, und **Bild 13** zeigt die berechnete Spannungsverteilung im L.W-Querschnitt. Mit zunehmender Breitenabnahme vergrößern sich die Spannungen im ganzen. Nach dem berechneten Ergebnis wird aber diese Tendenz umgekehrt am Breitenende, wo das Walzgut die Walze berührt. Dies bedeutet, daß mit zunehmender Breitenabnahme die Lokalisierung der Formänderung am Breitenende schwächer wird und sich statt dessen die Verformungszone zur Breitenmitte ausbreitet.

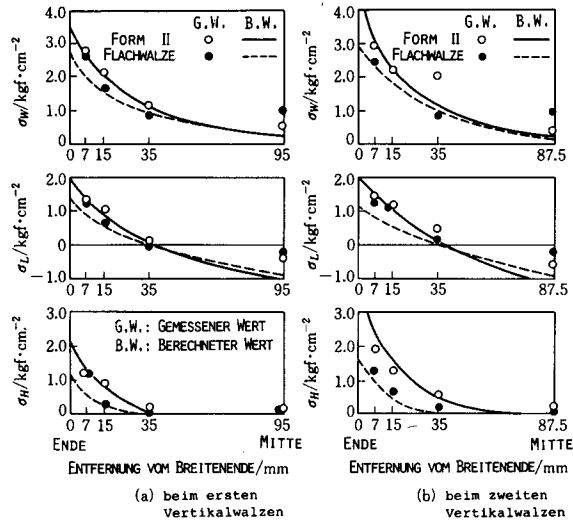


Bild. 9 Verteilung der maximalen Spannungen beim Vertikalwalzen mit Flachwalze und Kaliberwalze von Form II

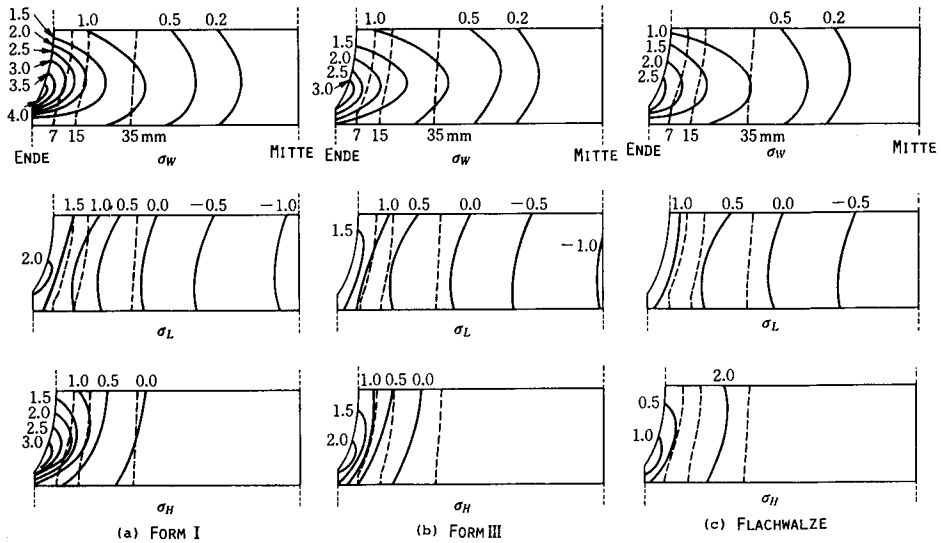
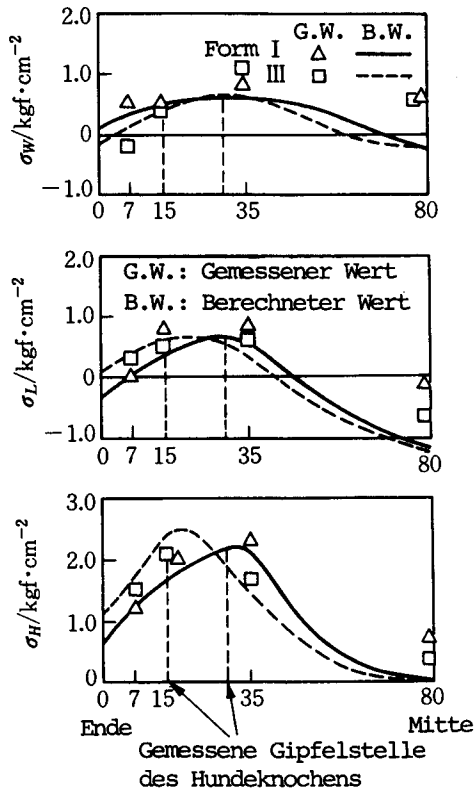
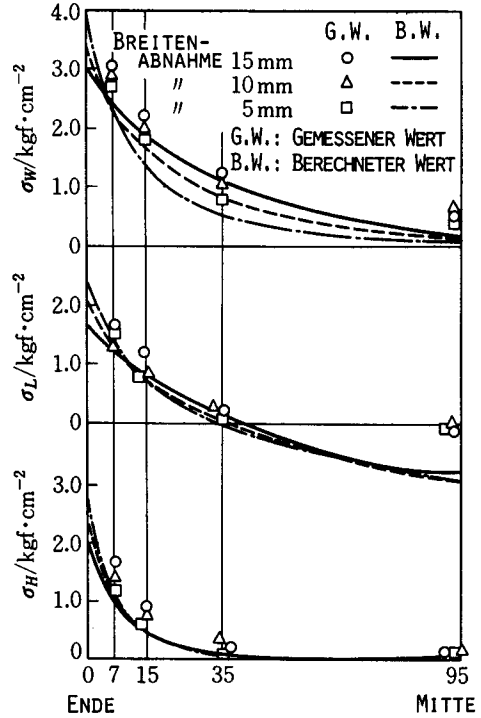


Bild. 10 Berechnete Ergebnisse über die Spannungsverteilung beim ersten Vertikalwalzen von Form I, Kaliberwalze von Form III und Flachwalze



Entfernung vom Breitenende/mm

Bild. 11 Verteilung der maximalen Spannungen während des Horizontalwalzens nach dem Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I und Form III.



ENTFERNUNG VOM BREITENENDE/mm

Bild. 12 Verteilung der maximalen Spannungen während des ersten Vertikalwalzens anhand der Kaliberwalze von Form III mit drei verschiedenen Breitenabnahmen von 5 mm, 10 mm und 15 mm.

4. Zusammenfassung

Durch eine Reihe von Modellversuchen mit Plasticine wurde es untersucht, wie die Verteilung der Spannungen im Walzgut beim Breitenabnahmenprozeß ist, und wie sich die Spannungsverteilung durch die Walzbedingungen verändert. Zugleich wurde die Spannungsverteilung nach dem Finite-Elemente-Verfahren analysiert, und die berechneten Ergebnisse wurden mit den gemessenen Ergebnissen verglichen. Obwohl es teilweise einen kleinen Unterschied dazwischen gibt, stimmen die beiden im ganzen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ überein. Wenn man die Gültigkeit der Voraussetzungen, z. B. die genaue Stellen und Richtungssetzung des begrabenen Drucksensors und die Genauigkeit der Fließspan-

nungsgleichung von Plasticine, berücksichtigt, kann man so schließen, daß der Unterschied zwischen den berechneten und gemessenen Ergebnissen in einem zulässigen Bereich liegt, und daß die von uns vorgeschlagene analytische Methode verlässlich ist.

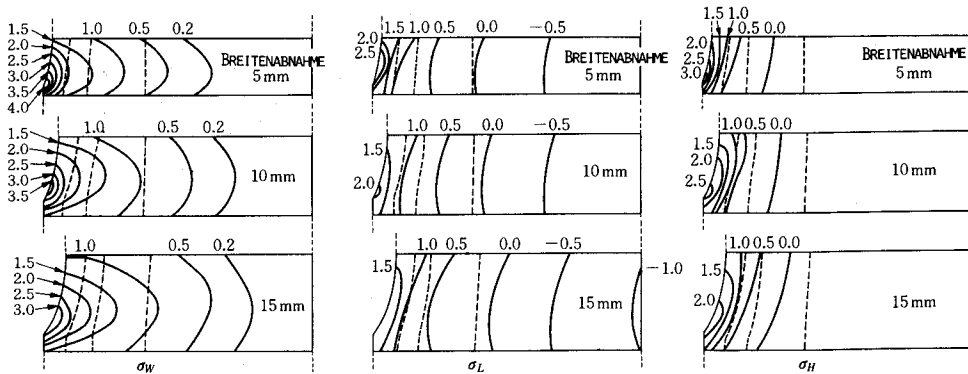


Bild. 13 Berechnete Ergebnisse über die Spannungsverteilung beim Vertikalwalzen anhand der Kaliberwalze von Form III mit drei verschiedenen Breitenabnahmen von 5 mm, 10 mm und 15 mm.

Die Eigentümlichkeit der Spannungsverteilung im Breitenabnahmenprozeß der Brammen kann wie folgt zusammengefaßt werden:

1) Beim Vertikalwalzen und dem nachfolgenden Horizontalwalzen wird die Spannung in der Walzrichtung σ_L in der Umgebung der Breitenmitte des Walzgutes eine verhältnismäßig große Zugspannung. Dies bedeutet, daß Innenrisse, die im Strangguß unerwartet erscheinen, in der Umgebung der Breitenmitte der Brammen durch das Walzen vergrößert werden können. Daher sollte die Entstehung von Innenrisen beim Stranggießverfahren völlig zurückgehalten werden.

2) Beim Horizontalwalzen wird die Spannung in der Walzrichtung σ_L nach den Walzbedingungen nicht nur in der Umgebung der Breitenmitte eine Zugspannung, sondern am Breitenende. Diese Zugspannung kann einen Anlaß für die Entwicklung der Risse an der Brammenkante geben.

3) Die Form der Vertikalwalze und die Größe der Breitenabnahme haben einen bedeutsamen Einfluß auf die Größe der Spannungen. Die am Breitenende entstehende Zugspannung beim Horizontalwalzen kann durch die Zunahme des Kaliberwinkels vermieden werden. Dagegen kann die in der Umgebung der Breitenmitte entstehende Zugspannung beim Vertikal- und auch Horizontalwalzen nicht vermieden werden.

Schrifttum

- 1) Takuda, H.; Mori, K.; Hatta, N.; Kokado, J.: J. Japan Soc. Technol. Plasticity 23 (1982) Nr. 262, S. 1103/08.
- 2) Takuda, H.; Mori, K.; Hatta, N.; Kokado, J.: J. Japan Soc. Technol. Plasticity 24 (1983) Nr. 264, S. 39/46.
- 3) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: Arch. Eisenhüttenwes. 54 (1983) Nr. 12, S. 491/97.
- 4) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: Memoirs of the Fac. of Eng., Kyoto Univ.
- 5) Chijiwa, K.; Hatamura, Y.; Hasegawa, N.: J. of The Iron and Steel Institute of Japan 66 (1980) Nr. 5, S. 496/505.