

Neuere Entwicklungen in der Blechumformung

Herausgegeben von
Mathias Liewald

TECHNISCHE
INFORMATIONSBIBLIOTHEK
UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
HANNOVER



INSTITUT FÜR UMFORMTECHNIK
DER UNIVERSITÄT STUTTGART



DEUTSCHE GESELLSCHAFT
FÜR MATERIALKUNDE E.V.



WERKSTOFF-
INFORMATIONSGESELLSCHAFT

Presshärten von USIBOR 1500 P: Simulationsbasierte Bauteil- und Prozessanalyse

Dr.-Ing. P. Hein; Dipl.-Ing. R. Kefferstein
Arcelor Flat Carbon Steel Europe

Dipl.-Ing. Y. Dahan
CEMEF, Ecole des Mines de Paris, Sophia Antipolis (F)

Zusammenfassung

Warmumgeformte höchstfeste Borstähle finden in Rohkarosserien immer stärkeren Einsatz. Tatsächlich ermöglicht dieses Material in Verbindung mit der zugehörigen Warmumformtechnologie (Presshärten) weitaus höhere Festigkeiten (1500 MPa) als die hochwertigsten derzeit verfügbaren Kaltumformstähle. Darüber hinaus wird durch die Warmumformung der traditionelle Kompromis zwischen hoher Festigkeit, niedriger Umformbarkeit und hoher Rückfederung überwunden.

In diesem Artikel werden allgemeine Marktendenzen im Bereich der Warmumformung diskutiert. Daneben wird ein Überblick über die wichtigsten Parameter gegeben, die das Prozessfenster der Warmumformung bestimmen. Eine Versuchsanordnung wurde entwickelt, um die Grenzformänderungen von USIBOR 1500 P bei der Warmumformung zu bestimmen. Die Anwendung der FE-Analyse bei der Warmumformung wird vorgestellt und der Ablaufplan einer typischen Machbarkeitsstudie beschrieben, wie sie von Arcelor für Kunden realisiert wird.

1 Presshärten von USIBOR 1500 P

1.1 Verfahrensbeschreibung

Das Verfahrensprinzip der Warmumformung ist eng verbunden mit den Möglichkeiten, welche die chemische Zusammensetzung borlegierter Stähle (Abb. 1) bietet, nämlich ein robustes Prozessfenster für das Härten durch martensitische Umwandlung.

Der Prozessablauf beginnt mit der Erwärmung der Platinen bis zur vollständigen Austenitisierung (900 °C bis 950 °C für 4 bis 10 Minuten). Die Bleche (Abb. 7) werden danach

innerhalb kürzester Zeit in die Umformpresse transferiert. Bei hohen Temperaturen (650 °C bis 850 °C) hat das Material eine ausgezeichnete Umformbarkeit, was die Erzeugung von relativ komplexen Geometrien in nur einer Umformstufe ermöglicht.

C	Mn	Si	Cr	Ti	B
0,25	1,4	0,35	0,3	0,05	0,005

Abb. 1: Chemische Analyse von USIBOR 1500 P (Maximum- %)

Die Abschreckung (martensitische Transformation, siehe Abb. 5) erfolgt unmittelbar nach der Umformung, wobei die Wärme vom geschlossenen Werkzeug aufgenommen und abgeführt wird (Abkühlgeschwindigkeit zwischen 50°C/s und 100°C/s). Die gesamte Durchlaufzeit (Transfer + Umformung + Abkühlung im Werkzeug) liegt heute typischerweise zwischen 15 s und 25 s.

Die Teile verlassen die Fertigungskette bei ungefähr 150°C mit den folgenden endgültigen, wiederholbar darstellbaren und homogenen mechanischen Eigenschaften: Einer Zugfestigkeit von 1400 MPa bis 1600 MPa und einer Streckgrenze zwischen 1000 MPa und 1200 MPa (Abb. 2).

UTS	YS	EI% (A5)	EI% (ISO 20x80)	HV_{10kg}
1500 MPa	1100 MPa	9%	6%	480 HV

Abb. 2: Typische mechanische Eigenschaften von USIBOR 1500 P nach Warmumformung und Abschreckung im Werkzeug

Neben der guten Umformbarkeit bei erhöhter Temperatur besteht ein weiterer Vorzug der Warmumformung darin, dass eine Rückfederung des Werkstücks nach Entnahme aus dem Werkzeug ausbleibt. Dies ist ein erheblicher Vorteil im Vergleich zur konventionellen Kaltumformung von Werkstoffen auf diesem Festigkeitsniveau.

1.2 Unbeschichteter und beschichteter Borstahl

Werden unbeschichtete Borstähle verwendet (blank/kaltgewalzt oder warmgewalzt/gebeizt), so bildet sich auf den Platinen während des Transfers zur Presse und während der Umformung eine ungleichmässige, abrasive Zunderschicht, selbst wenn innerhalb des Ofens Schutzgasatmosphären verwendet werden. Darüber hinaus ist es grundsätzlich unmöglich, mit unbeschichtetem Material ein gewisses Maß an Oberflächenentkohlung (bis 60 µm) zu vermeiden, was die endgültigen Eigenschaften der

Werkstücke beeinträchtigt. Daher muss nach der Umformung ein Sandstrahlen vorgenommen werden, um die Zunderschicht zu entfernen. Dieser Vorgang ist kostenintensiv und kann sich nachteilig auf die geometrischen Toleranzen dünner Teile auswirken.

USIBOR 1500 P^{®1} ist ein von Arcelor entwickelter, vorbeschichteter Borstahl mit einer etwa 25 µm dicken metallischen Beschichtung aus Aluminium-Silizium („Alusi“: 90% Al, 75 g/m²/Seite, Abb. 3). Während der Wärmebehandlung im Ofen wandelt sich diese Schutzschicht in eine legierte Fe-Al-Si-Schicht um. Diese hat ein blaues oder graues Erscheinungsbild, ist hochgradig haftbeständig und weist gute Korrosionseigenschaften auf (Abb. 4).

Teile aus USIBOR 1500 P können nach der Warmumformung direkt lackiert werden (keine Zunderschicht – daher kein Sandstrahlen nötig). Sie besitzen ausgezeichnete geometrische Toleranzen und weisen keinerlei Entkohlung auf (Schutzeffekt der Beschichtung während der Wärmebehandlung).

Die Verwendung von USIBOR 1500 P bietet zahlreiche technische und ökonomische Vorteile für den Hersteller und den Umformer. Da die Schutzgasatmosphäre in den Öfen (z.B. Stickstoff) wie auch das Sandstrahlen der fertigen Teile entfällt, kann hier Zeit und Geld gespart werden. Zudem müssen die Werkstücke nicht nachträglich mit teuren Schutzschichten (z.B. auf Zinkbasis) versehen werden.

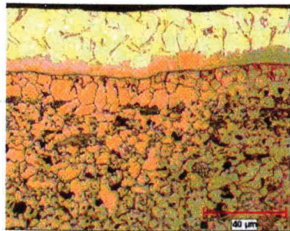


Abb. 3: Struktur der Al-Si-Beschichtung vor der Warmumformung (USIBOR 1500 P)

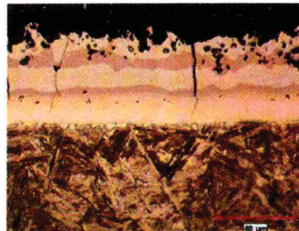


Abb. 4: Struktur der legierten Al-Fe-Si-Schicht nach der Warmumformung

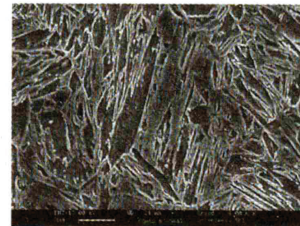


Abb. 5: Martensitische Struktur nach der Warmumformung (REM-Aufnahme)

¹ USIBOR[®] ist ein weltweit gesetzlich geschütztes Warenzeichen der Arcelor Gruppe. Darüberhinaus führt Arcelor zahlreiche Patente über direkte oder indirekte Warmumformungsverfahren für aluminiumbeschichtete und zink- oder zinklegierungsbeschichtete Stahlbleche sowie die damit verbundenen Bauteile.

1.3 Markttrends

Das Presshärten von borhaltigem Flachstahl wurde Ende der 90er Jahre zunächst bei der Herstellung eher einfacher Automobilteile wie etwa Seitenaufprallträgern und Stoßfängern eingesetzt. Heute weist dieses Umformverfahren eine außergewöhnliche Entwicklungs- und Wachstumsdynamik in der Anwendung für zahlreiche Strukturbauteile auf (Abb. 6).

Die technischen und organisatorischen Schwierigkeiten, welche die Einführung eines derart bahnbrechenden Materials und der zugehörigen Technologie mit sich bringt, werden durch die neuen Möglichkeiten aufgewogen, die sich für die Fahrzeugentwickler bei ihren Bemühungen um Crashesicherheit, Gewichtsreduzierung und Kostenkontrolle ergeben /1/, /2/.

Die große Mehrheit der Automobilhersteller spezifiziert für ihre neuen Fahrzeuge inzwischen warmumgeformte Bauteile. Neue Warmumformer betreten den Markt, und mehrere neue Warmform-Pressenlinien entstehen derzeit weltweit /3/.

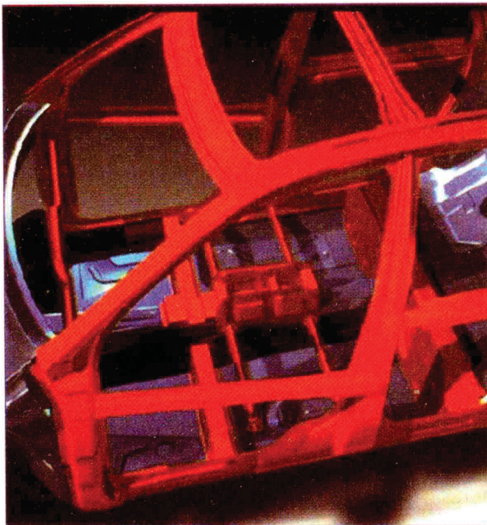


Abb. 6: Einsatz von warmumgeformten Strukturbauteilen im BIW

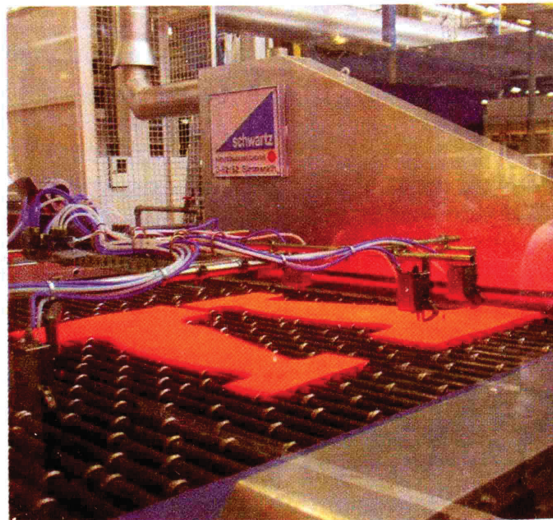


Abb. 7: B-Säulen-Platinen am Ausgang des Ofens kurz vor der Warmumformung (Quelle: VW)

Heute kommt die Warmumformung bei der Herstellung zahlreicher Automobilteile zum Einsatz: vordere und hintere Stoßfänger, A-Säulen (oder deren Verstärkungen), B-Säulen

(oder deren Verstärkungen), Dachrahmen, Schweller, Seitenverstärkungen, Tunnel, Bodenverstärkungen, Türholme...

Einige neue Konzepte, z.B. für warmumgeformte Patchworks und warmumgeformte Tailor Welded Blanks (Laser-TWBs), befinden sich in der Entwicklung.

Der geschätzte Gesamtverbrauch an borlegiertem Flachstahl für das Presshärten lag 2004 in Europa bei etwa 60.000 t/Jahr bis 80.000 t/Jahr. 2008/2009 wird dieser Verbrauch in Europa stark anwachsen auf bis zu 300.000 t/Jahr (siehe Abb. 8). Die gleiche Tendenz lässt sich in Japan und Nordamerika beobachten.

Zwischen 2004 und 2009 werden über 20 neue Warmumform-Pressenlinien errichtet werden. Einige OEM's, wie z.B. VW, haben umfangreiche Investitionen in diese Technologie getätigt.

	2004	2009
Warmform-Pressenlinien in Europa	15	40
Warmumformer in Europa (inkl. Systemhersteller)	3	9
warmumgeformte B-Säulen in europäischen Fahrzeugmodellen	7	20
warmumgeformte B-Säulen aus USIBOR 1500 P in europäischen Fahrzeugmodellen	0	11

Abb. 8: Wachstumsprognose für das Presshärten in Europa

Aufgrund ihrer zahlreichen Vorzüge (Korrosionseigenschaften, kein Sandstrahlen notwendig, keine Schutzgasatmosphäre im Ofen und keine nachträglicher Beschichtung erforderlich,...) wird die vorbeschichtete Variante USIBOR 1500P in neuen europäischen und nordamerikanischen Fahrzeugen immer öfter spezifiziert und verwendet.

USIBOR 1500P findet z.B. Verwendung in den Säulen und Schwellern des neuen VW Passats (Abb. 9 und 10) und der Mercedes S-Klasse, in den A-Säulen von Landrover-Fahrzeugen, in den Stoßfängern des Ford Mustang... Ein ähnlicher Trend lässt sich auch in Japan beobachten.



Abb. 9: Warmumgeformte Bauteile aus USIBOR 1500 P im VW Passat (Quelle: VW)



Abb. 10: B-Säule des VW Passat

2 Die wichtigsten Prozessparameter

Bei der Definition eines Warmumformvorgangs für ein Bauteil und der Auswahl der zugehörigen Maschinenteknologie muss besonders auf jene Faktoren geachtet werden, die direkten Einfluss auf Werkstückqualität, Durchlaufzeit und Prozessstabilität haben. Alle drei Kriterien beeinflussen erheblich die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

2.1 Transferzeit

Die Dauer des Transfers zwischen Ofen und Werkzeug muss weitestgehend reduziert werden. Tatsächlich kann der Temperaturverlust der Platine abhängig von ihrer Stärke mehrere 10°C/s betragen, und eine zu niedrige Umformtemperatur kann folgende Schwierigkeiten verursachen:

- Verminderte Umformbarkeit des Materials (siehe 3.3)
- Lokales Auftreten von Phasenumwandlung während der Umformung, was zu inhomogenem Materialverhalten und Dehnungslokalisierungen führen kann
- Hohe Reibung oder sogar Aufschweissungen in Radien (z.B. Ziehkante)
- Ablagerung von pulverförmiger Al-Fe-Beschichtung im Werkzeug

2.2 Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung im Ofen sollte so ausgeführt werden, dass die Kinetik der austenitischen Umwandlung [4] und der intermetallischen Legierungsreaktion zwischen der Al-Si-Beschichtung und dem Trägermaterial der Platine beachtet wird.

Eine zu rasche Erwärmung der Platinen kann dazu führen, dass die Al-Si-Beschichtung schmilzt und Metallablagerungen auf den Ofenrollen entstehen.

Eine zu kurze Verweildauer im Ofen birgt das Risiko einer unvollständigen Anlegierung, wodurch es zur Bildung von Aufschweissungen und fressendem Verschleiß kommen kann. Empfehlungen zum Prozessfenster für die Wärmebehandlung von USIBOR 1500 P werden von Arcelor zur Verfügung gestellt.

2.3 Umformgeschwindigkeit

Die Umformgeschwindigkeit sollte hoch genug sein, um den Wärmeaustausch zwischen Platine und Werkzeug während der Umformung zu minimieren. Auch Auswirkungen der Formänderungsgeschwindigkeit auf das Materialverhalten müssen berücksichtigt werden.

2.4 Werkzeuggestaltung

Wie bei jedem Umformvorgang, so ist auch hier die Werkzeuggestaltung von zentraler Bedeutung für die Effektivität eines Produktionsverfahrens. Sie erfordert sowohl hohe technische Fachkompetenz als auch gute praktische Fähigkeiten im Werkzeugbau. Im Bereich der Warmumformung ist sie sogar besonders belangvoll, da es eine zusätzliche Schwierigkeit zu meistern gilt: Den Wärmetransfer. Das Werkzeug muss erhebliche Energieflüsse (bis zu 100 kW) durch integrierte Kühlvorrichtungen aufnehmen und ableiten. Dies belastet besonders die äußeren Schichten des Werkzeugs, die einem Temperaturgradienten in einer Größenordnung von 25 °C/mm ausgesetzt werden.

Hinsichtlich des Werkzeugmaterials muss ein Kompromis zwischen guter Abriebfestigkeit über weite Temperaturbereiche und guter Wärmeleitfähigkeit gefunden werden. Sowohl klassische Kaltumformstähle (z.B. X160CrMoV12) und Kunststoff-formenstähle als auch Warmarbeitsstähle kommen bei industriellen Warmumformwerkzeugen zum Einsatz. Ein höherer Anteil an Legierungszusätzen (Cr, Mo, V) hat positive Auswirkungen auf die Härte, senkt jedoch die Wärmeleitfähigkeit rasch unter 20 W/m/K. Daher können Konzepte, die eine Segmentierung in Bereiche aus unterschiedlichen Materialien vorsehen, gute Lösungen zur Anpassung der Materialeigenschaften an die Bedürfnisse darstellen.

Beschichtungen (z.B. Ti-Al-N oder Cr-V-N) können den Widerstand gegen Abrasivverschleiß erhöhen und die Adhäsionsneigung vermindern /5/. Laufende Entwicklungs-

arbeiten bemühen sich um die Entwicklung alternativer Werkzeugmaterialien auf der Basis von Nichteisenlegierungen mit deutlich höherer Wärmeleitfähigkeit.

3 Umformbarkeit von USIBOR 1500 P

3.1 Einleitung

In der Kaltumformung wird die Umformbarkeit eines Blechmaterials üblicherweise anhand der Grenzformänderungskurve beschrieben. Ihre experimentelle Bestimmung und ihre Gültigkeits- und Anwendungsbedingungen sind gründlich untersucht worden, und Machbarkeitsstudien mittels FEM basieren heute auf dem Vergleich zwischen der berechneten Dehnungsverteilung und dem Grenzformänderungsdiagramm, ergänzt durch andere Kriterien (z.B. Faltenbildung). In recht großem Umfang stehen heute Erkenntnisse zur Verfügung, um Dehnungsverteilungen auf umgeformten Werkstücken unter Berücksichtigung des Grenzformänderungsdiagramms zu interpretieren und auch mit Konstellationen umzugehen, in denen das Grenzformänderungsdiagramm nicht strikt angewandt werden kann (enge Biegeradien, Schnittkanten usw.).

Wenn wir den gleichen Formalismus für die Warmumformung beibehalten möchten, muss mindestens eine weitere Dimension (Temperatur) zum Verzerrungszustand (ε_1 , ε_2) hinzugefügt werden, und es muss überprüft werden, auf welche Weise Formänderungsgeschwindigkeit, Dehnungs- und Temperaturverlauf wie auch Dehnungs- und Temperaturgradienten lokale Einschnürungen und Versagen beeinflussen. Es wird daran gearbeitet, die experimentellen, theoretischen und numerischen Aspekte der Umformbarkeit im Warmumformprozess zu erforschen.

3.2 Schadensanalyse

Verschiedene Warmumformversuche wurden durchgeführt, um die Einschnürungen und Brüche an versagten Werkstücken zu untersuchen. Während der Warmumformung entstehen Dehnungskonzentrationen meist in relativ warmen Bereichen der Platine, die die Umformkraft zwischen relativ kalten Bereichen übertragen müssen, z.B. in vertikalen Zargen zwischen der Stirnfläche des Stempels und der Ziehkante. Die Lokalisierung von Dehnungen hängt eng mit den Temperaturgradienten in der betroffenen Zone zusammen.

Abb. 11a zeigt den Querschnitt einer Bruchstelle: Die Ausdünnung entsteht auf sowohl konzentrierte wie auch kontinuierliche Weise nahe der Bruchregion. Außerdem scheint

sie symmetrisch in Blechdickenrichtung zu verlaufen. Die intragranularen Mikroporen an der Spitze der Bruchstelle (Abb. 11b) sind typisch für ein duktiles Versagen.

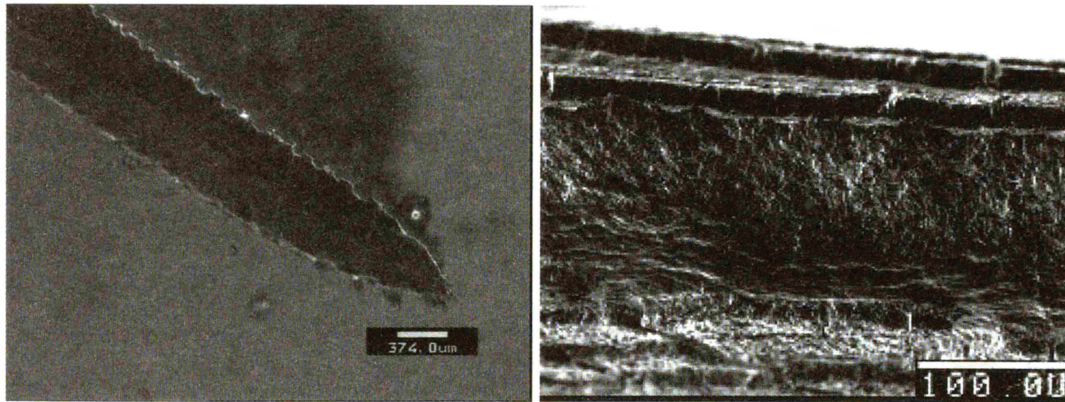


Abb. 11a und 11b: Mikroskopischer Querschnitt (links) und REM-Frontalsicht (rechts) der Bruchstelle

3.3 Umformbarkeitstests

Um experimentelle Daten über die Umformbarkeit zu erhalten, wurden Warmumformversuche mit einem modifizierten Nakazima-Test durchgeführt. Die Temperatur- und Dehnungsverteilungen wurden mit Hilfe von Pyrometern und Mustererkennungssystemen ermittelt. Parallel dazu wurde ein numerisches Modell des Warmumformprozesses mit der FE-Software Forge2[®] und Forge3[®] entwickelt. Die durch numerische Simulation gewonnenen Dehnungsverteilungen wurden mit jenen verglichen, die Aramis und Asame lieferten.

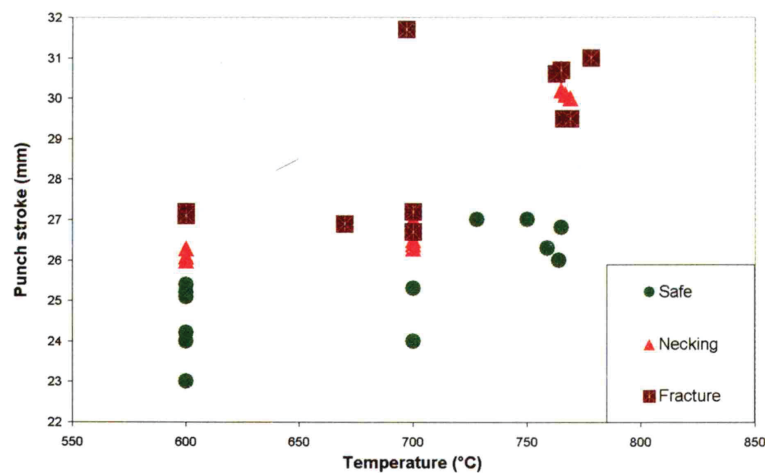
Die experimentelle Bestimmung der Umformbarkeitsgrenzen muss verschiedene Effekte wie Wärmetransfer (anisothermer Prozess), Phasenumwandlung (instabile austenitische Struktur), dreiachsige Spannungen (Biegedehnungen), Formänderungsgeschwindigkeit (viskoplastisches Verhalten) und Dehnungspfad (Platinenform und Reibung) berücksichtigen. Diese Parameter werden verändert, indem die Prozessdauer sowie die Anfangstemperatur, die Breite und die Form der Platine variiert werden, um ihren jeweiligen Einfluss auf die Umformbarkeit zu analysieren. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse zum Einfluss der Anfangstemperatur und der Platinenbreite detailliert ausgeführt.

Es wurden mehrere Warmumformversuche durchgeführt, bei denen entweder die Anfangstemperatur der Platine (Abb. 12) oder die Platinenbreite (Abb. 13) variiert wurde.

Jede umgeformte Platine wurde dann analysiert und ihr eventuelles Versagen klassifiziert.

3.3.1 Temperatur

Die experimentell durchgeführte Veränderung der Anfangstemperatur der Platine von 600 °C auf 800 °C ermöglicht es, den Einfluss der Temperatur auf die Umformbarkeit zu analysieren: Je höher die Anfangstemperatur, desto größer ist der maximal erreichbare Stößelweg ohne Bauteilversagen. Den hier erzielten experimentellen Ergebnissen zufolge ist für die gegebenen Prozessbedingungen eine Bauteiltiefe von 27 mm nur dann erreichbar, wenn die Anfangstemperatur der Platine über 720 °C liegt. Unterhalb dieser Temperatur sind Einschnürungen und Brüche im kritischen Bereich der Platine sehr wahrscheinlich.



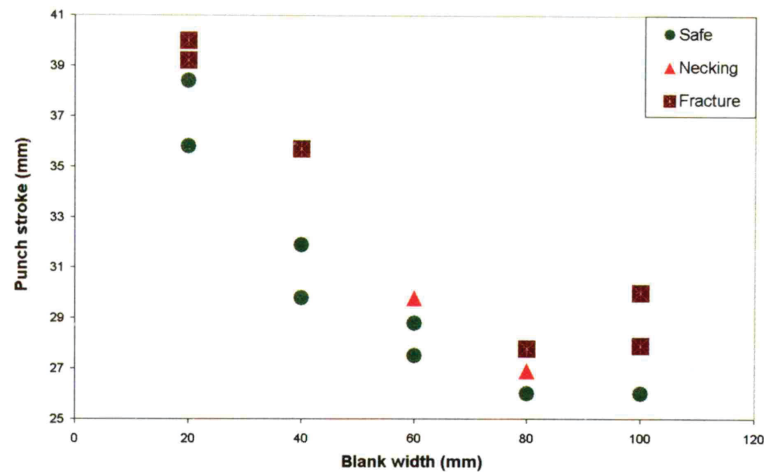


Abb. 13: Einfluss der Platinenbreite auf den maximal erreichbaren Stößelweg

4 Schritte einer numerischen Machbarkeitsanalyse beim Presshärten

Grundsätzlich besteht eine FE-basierte Machbarkeitsstudie für ein warmumgeformtes Bauteil aus einer Folge von Berechnungsdurchläufen mit zunehmender Genauigkeit, aber auch zunehmender Komplexität und Berechnungsdauer.

4.1 Ein-Schritt-Verfahren

Mit Hilfe gängiger kommerzieller ein-Schritt-Solver kann eine Dehnungsverteilung auf der CAD-Geometrie des Werkstücks berechnet werden. Diese Information ist hilfreich beim Aufspüren schwerer Umformprobleme und beim Durchführen von Geometrieänderungen am Werkstück.

Da weder Materialverhalten noch Wärmeaustausch oder Anbauflächen berücksichtigt werden, steht und fällt die Diagnose hier mit dem Sachverstand und dem Erfahrungswissen des Entwicklers bzw. des Methodenplaners.

Der Platinenzuschnitt ist ein wichtiges Ergebnis dieser Berechnung. Auf ihrer Basis können erste Kostenkalkulationen erfolgen.

4.2 Isotherme FE-Analyse

Als nächster Schritt erfolgt ein Umstieg auf gängige FE-Simulationssoftware für Umformberechnungen. Plastischer Materialfluss und Reibung werden modelliert, der Wärmeaustausch bleibt jedoch unberücksichtigt. Die Fließkurve, die das Verfestigungs-

verhalten des Materials beschreibt, muss sorgfältig an das vermutete Temperaturniveau des Prozesses angepasst werden.

Tatsächlich hängt auch hier die Aussagekraft solch einer isothermen Berechnung stark vom Erfahrungswissen und von der Analogiebildung zu vorherigen Fällen ab. Oft ist der Schritt lediglich eine Modellüberprüfung, um einen reibungslosen Ablauf der anisothermen Berechnung vorzubereiten.

Befriedigende Genauigkeit kann für flache Werkstücke (z.B. Seitenaufprallträger und Dachversteifungen), große Blechdicken und sehr hohe Umformgeschwindigkeiten erzielt werden.

4.3 Gekoppelte thermomechanische Berechnung

Für komplexe Strukturbauteile ist eine vollständige thermomechanische Berechnung von großem Nutzen, um die Werkstückgeometrie und die Umformprozessgestaltung abschließend zu validieren. Sie berücksichtigt die Kopplungseffekte zwischen der Verformung des Materials und dem Wärmeaustausch, und sie reagiert sehr sensibel auf die Kontaktbedingungen mit dem kalten Werkzeug /6/, /7/. Temperatur- und Dehnungsgradienten werden hier präzise und einschließlich ihrer gegenseitigen Beeinflussung modelliert, was bei der isothermen Berechnung nicht der Fall ist. Abb. 14 zeigt am Beispiel einer B-Säule (erste Berechnungen, die spätere Design- und Verfahrensänderungen nahegelegt haben), dass die isotherme Berechnung das Dehnungsniveau in kritischen Bereichen unterbewertet, dass sie darüber hinaus den Ort des Versagens nicht immer exakt vorhersagen kann und dass sie nicht immer eine sichere Beurteilung der Machbarkeit eines komplexen Werkstücks zulässt.

Aufgrund der hohen Empfindlichkeit des Umformprozesses gegenüber Temperaturgradienten ist es wichtig, die Wartephase in die Simulation einzubeziehen (Zeit, in der die Platine auf dem Untergesenk liegt, während sich das Obergesenk nähert) /8/. Für bestimmte Anwendungen kann sogar die Abschreckphase (geschlossenes Werkzeug) simuliert werden, um die martensitische Transformation nachzuvollziehen und die Prozeßdauer abzuschätzen, nach der das Werkstück sicher aus dem Werkzeug entnommen werden kann.

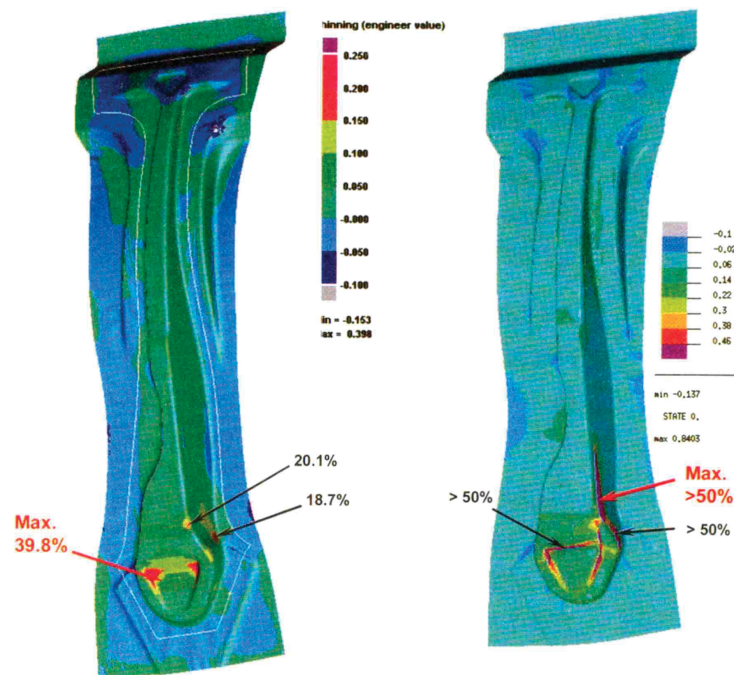


Abb. 14: Vergleich der Dickenabnahme für eine B-Säule, erstellt mittels einer isothermen Berechnung (bei 700 °C, links) und einer thermomechanischen Berechnung (rechts)

Literatur

- /1/ Griesbach, B. Neue Werkstoffe im Fahrzeug – Freund oder Feind von
Knott, S. Werkzeugbau und Produktion? In: Ebert, F. (Edtr.): Alumi-
nium and Steel – Forming in Automotive Engineering.
Proc. Of the 6th European Conf., Bad Nauheim, 17.-
18.2.05, 99-114
- /2/ Franz, T. Produktionstechnische Aspekte von höchstfesten Stahlgü-
ten. In: EFB (Edtr.): Proc. of the EFB-Kolloquium 2005,
15.-16.2.05, Fellbach, p. 249-255
- /3/ Kahl, M. Some like it hot. Automotive Manufacturing Solutions
(2004), Sept/Oct, 49-52
- /4/ Merklein, M. Einflussgrößen im Presshärtprozess. Proc. of the Car Body
Hoff, C. Colloquium CBC 2005, Chemnitz, 2005, p. 137-153
Lechler, J.

- /5/ Weber, M. Werkzeugbeschichtungen für die temperierte Umformung. Proc. of the Workshop „Temperiertes Umformen – Stand – Effekte – Aussichten“. 29.9.05, FhG IWU Chemnitz
- /6/ Garcia-Aranda, L. Etude thermo-mécanique et modélisation numérique de l'emboutissage à chaud de l'USIBOR 1500. Ecole des Mines de Paris. PhD-Thesis (2004)
- /7/ Hein, P. A Global Approach of the Finite Element Simulation of Hot Stamping.
In: Advanced Materials Research Vols 6-8 (May 2005), 763-770. Trans Tech Publications Ltd., Switzerland
- /8/ Lorenz, D.
Roll, K. Modelling and Analysis of Integrated Hotforming and Quenching Processes.
In: Advanced Materials Research Vols 6-8 (May 2005), 787-794. Trans Tech Publications Ltd., Switzerland