

© 1991 ISIJ

論 文

熱間圧延における高圧水脱スケール時の
衝突圧和田 忠義*・上田 正雄*²・押見 正一*³Impact Pressure of Water in Hydraulic Descaling during Hot Strip
Mill Rolling

Tadayoshi WADA, Masao UEDA and Masakazu OSHIMI

Synopsis :

Hydraulic descaling is commonly used to remove scale formed during reheating and continuous rolling of steel strips.

On an experimental survey of parameters which affect the descaling behaviour, impact pressure was measured precisely both by spraying over a plasticine (a modelling material) on the basis of design of experiments and by using a pressure converter. It was found that the impact pressure has good correlations with the water consumption V at a pressure of 9.8 MPa, water pressure P , rolling speed v and distance H between the material and the nozzle.

The thickness loss Δt of plasticine and the impact pressure p by hydraulic descaling can be then expressed by the descaling parameters as follows;

$$\Delta t = 2000 PV / (vH^2) \text{ (cm, correlation coefficient : 0.94)}$$

$$p = 5.64 PV / H^2 \text{ (MPa)}$$

The impact pressure calculated from the equation is in excellent agreement with H. HOJAS' results.

Since the impact pressure required to remove the primary scale is much higher than secondary scale, a careful set up of the conditions is essential to complete the descaling.

Key words : hydraulic descaling; impact pressure; primary scale; secondary scale.

1. 緒 言

薄鋼板の製造に際し、鑄片を加熱および熱間圧延中に生成した酸化スケールは、表面疵の原因となるため、高圧水装置で脱スケールされ、スケール疵のない清浄な表面の鋼板が製造される。高圧水による脱スケール性は、スケール皮膜の性状と高圧水の噴射条件との関係が強いと考えられる。

R. F. TYLECOTE ら¹⁾は、高温鋼材のスケール密着性に及ぼす要因について報告しており、中でも鉄と鉄酸化物の体積比 : Pilling-Bedworth (P-B) 比²⁾に重点をおいている。

脱スケールに関する研究では、松野³⁾は、高温鋼材のスケールのプリスターが脱スケール性に影響を及ぼしている。しかし、脱スケール時の水圧力は 1 MPa 以下であり、熱延工場で通常脱スケールに使用されている水圧力の約 15 MPa に比べて約 1 桁も低く、十分なシ

ミュレーションになっていない。

次に、T. SHEPPARD ら⁴⁾は、高温鋼材の脱スケール機構について、①高圧水による急冷作用、②破壊作用、③爆発作用および④スケール皮膜の成長による圧縮応力などにより脱スケールされるとしている。

この中で、急冷、破壊および爆発作用については、高圧水を噴射時の水圧力、ノズル流量およびノズルの取付け位置などの高圧水の噴射条件との関係が強いと考えられる。しかし、これらの要因については不明な点が多い。ここでは、高圧水の噴射条件を表すパラメーターとして衝突圧を用いて検討することにした。

高圧水を噴射時の衝突圧については、H. HOJAS ら⁵⁾、W. HEROLD⁶⁾ および O. HENNIG ら⁷⁾の研究がある。これらはいずれも衝突圧の計算式を提唱しているが、統一的な式がなく、しかも実用的でない。かつ、各要因の寄与率が不明で、多くの場合定性的な対応がとられてきた。

したがって、高圧水を噴射時の衝突圧に及ぼす各種要

平成 2 年 9 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 3 月 26 日受付 (Received Mar. 26, 1990)

* 新日本製鉄(株)鉄鋼研究所 (現:新日本製鉄(株)人事部) (Steel Research Laboratories, Now Personnel Division, Nippon Steel Corp.)

*² 新日本製鉄(株)堺技術研究部 (現:ホタニ商事(株)) (Sakai R & D Lab., Nippon Steel Corp., Now Hotani Co., Ltd.)

*³ 新日本製鉄(株)鉄鋼研究所 (Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

2. 実験方法

2・1 供試材

2・2 高圧水によるプラスティシンの厚み減少量に及ぼす要因の調査

高压水喷射装置 TS-30AHF 型 (最大压力 9.8 MPa)

Table 1. Experimental conditions of hydraulic descaling.

Factor	Unit	Level	Remarks
Water pressure	P	MPa	5.9 7.8 9.8
Water consumption at a pressure of 9.8MPa	V	l/s	0.8, 1.03, 1.5
Rolling speed	v	cm/s	40, 80, 120
Distance between material and nozzle	H	cm	19, 24, 29
Gradient angle	θ	°	5, 15, 25
Descaling direction	D	—	R.D. on upper and lower plane. Inverse D. on top.
Interaction		—	$P \times v$, $V \times v$, $v \times H$
Angle of torsion	δ	°	15
Spraying angle	$\angle Z$	cm	30
Jet width			$2H \tan(\tau/2) / \cos \theta$
Descaling No.		times	10
Orthogonal table			$L_{27}(3^{13}) = 27$

Table 2. Plans $L_{27}(3^{13})$ and results.[illegible]

R & I : Rolling and Inverse Direction U & L : On Upper and Lower Plane T.L. : Thickness Loss of Plasticine

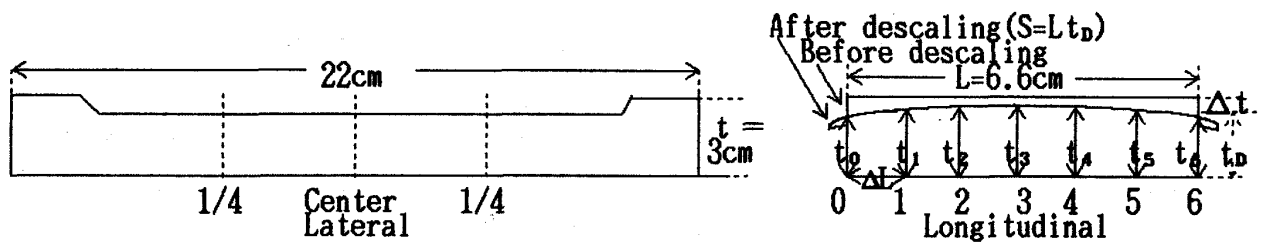


Fig. 1. Schematic illustration of cross sectional shape of plasticine after hydraulic descaling test.

最大流量 100 l/min) を用いて、上記供試材に高压水を噴射後の厚み減少量を測定した。Table 1 に高压水の噴射条件を示す。それらの要因として、水圧力 P (MPa)、ノズル流量 V (l/s)、ノズルと供試材間の垂直距離 H (cm)、傾斜角 θ ($^\circ$)、振り角 δ ($^\circ$)、噴射方向 D および通板速度 v (cm/s) を実験計画法⁹⁾ による $L_{27}(3^{13})$ の直交表で解析した。Table 2 に各要因のわりつけを示す。ここで、厚み減少量を大きくするため、噴射回数をそれぞれ 10 回とした。さらに、Fig. 1 に示すように、高压水を噴射後のプラスティシンの厚み減少量 Δt は、初期厚み t (cm) と高压水を噴射後の幅方向中央部の平均厚み t_D (cm) との差として計算した。ここで、高压水を噴射後のプラスティシンの断面積 S (cm²) は、幅方向中央部の断面を長さ方向に 6 等分し、シンプソンの公式で計算した。すなわち、

$$S = (\Delta L / 3) \{ t_0 + 4(t_1 + t_3 + t_5) + 2(t_2 + t_4) + t_6 \}$$

$$\Delta t = t - t_D = t - S / L \text{ である。}$$

ここで、 ΔL は供試材の長さの 6 分の 1、 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ および t_6 は高压水を噴射後の供試材の厚み、 L は供試材の初期の長さである。

2.3 プラスティシンの厚み減少量に及ぼす垂直距離およびノズル流量の影響調査

高压水を噴射する際の前記各要因の中で、熱延ラインで比較的に管理しやすい要因は、垂直距離およびノズル流量である。

そこで、プラスティシンの厚み減少量に及ぼす垂直距離およびノズル流量の影響を調査した。すなわち、Table 3 に示すように、ノズルが DNB1830 の時、水圧力は 7.8 MPa、DNB1530、1132 および 0830 の時、9.8

MPa とした。ここで、垂直距離は 19～34 cm の範囲で 3 cm 間隔とし、通板速度は 80 cm/s、傾斜角 15° および噴射方向は上面の正方向で一定にした。

2.4 高压水を噴射時の衝突圧の測定

高压水を噴射時の衝突圧を面圧計で測定した。測定条件は、ノズルは DNB1530、垂直距離は 28 cm で、水圧力は 9.8 MPa である。また、面圧計の受圧面は 20 cm ϕ で圧力変換器を用いて測定した。なお、衝突面積は、プラスティシンを静止させた状態で高压水を 6 s 噴射後、その凹み部から求めた。

3. 実験結果

3.1 プラスティシンの厚み減少量に及ぼす高压水の噴射条件の影響

Photo. 1 に高压水を噴射後のプラスティシンの厚み減少状況を示す。プラスティシンの厚み減少量は幅方向の中央部で最大で、長さ方向では頭部および尾部が中央部よりやや大きい。ここで、Table 2 に示した厚み減少量は幅方向の中央部での測定値を代表値とした。

次に、プラスティシンの厚み減少量に及ぼす高压水の噴射条件の各要因の影響を Fig. 2 に示す。また、Table 2 のデータをもとに分散分析を行った結果を Table 4 に示す。

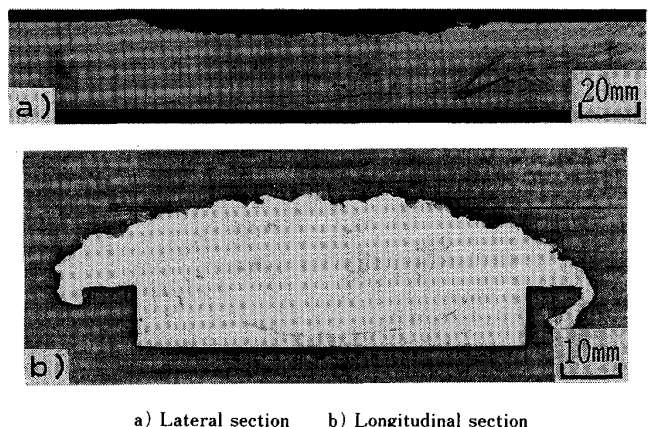


Photo. 1. Results of descaling test carried out on plasticine (Test No. 2).

Table 3. Effect of distance between material and nozzle on impact force by hydraulic descaling.

Nozzle	P (MPa)	H (cm)					
DNB 1830	7.8	19	22	25	28	31	34
1530	9.8	19	22	25	28	31	34
1132	9.8	19	22	25	28	31	34
0830	9.8	19	22	25	28	31	34

$v = 80 \text{ cm/s}$ $\theta = 15^\circ$ D : R. D. on top plane

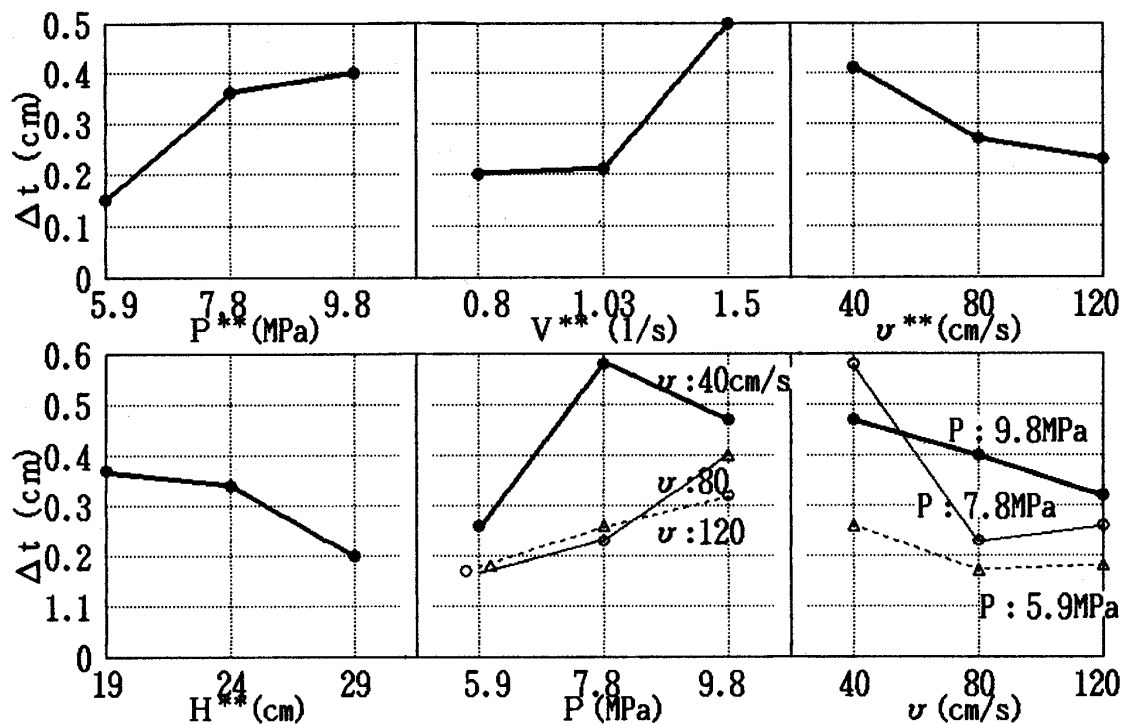


Fig. 2. Effect of descaling conditions on thickness loss of plasticine.

Table 4. Analysis table of variance.

Factor	Fluctuation of each unit S	Degree of freedom f	Variance V	Variance ratio F	Pure fluctuation S'	Contribution rate ρ
P	0.31	2	0.156	14.7**	29.0	20.7
V	0.52	2	0.259	24.4**	49.6	35.4
v	0.17	2	0.087	9.0**	15.3	11.6
H	0.15	2	0.077	7.3**	14.3	10.3
Pv	0.10	4	0.026	2.5	8.4	6.0
e	0.15	14	0.011		22.4	16.0
Total	1.40	26				100

** : Significant at 1%

プラスチックの厚み減少量に及ぼす高圧水噴射条件の各要因のうち、ノズル流量 V 、水圧力 P 、通板速度 v および垂直距離 H の影響が比較的に大きく、これらの各要因はそれぞれ 1% 有意である。ただし、傾斜角 θ 、噴射方向 D 、ノズル流量 V と通板速度 v との交互作用 Vv および通板速度 v と垂直距離 H との交互作用 Hv の変動が小さいので、誤差にプールした。

次に、Table 4 の分散分析結果から要因の効果を推定する。信頼限界は、信頼度を 95% として、誤差の分散 $V_e = 0.01$ 、その自由度 14、各要因の自由度 1 の F 表の 5% 値は 4.60 であるので、各要因の有効反覆数 $n_e = 9$ または 3 を代入すると、

$$\pm \sqrt{FV_e/n_e} = \pm \sqrt{4.60 \times 0.01/9} = \pm 0.07 \text{ または } \pm \sqrt{4.60 \times 0.01/9} = \pm 0.12$$

となる。すなわち、Fig. 2 に示したプラスチックの

厚み減少量 Δt に及ぼす各要因の中で、有効反覆数が 9 であるノズル流量 V 、水圧力 P 、通板速度 v および垂直距離 H は、それぞれの水準で ± 0.07 cm、また、有効反覆数が 3 の水圧力 P と通板速度 v の交互作用 Pv については ± 0.12 cm で示される範囲の信頼度が 95% である。

3.2 プラスチックの厚み減少量に及ぼす垂直距離およびノズル流量の影響

Fig. 3 にプラスチックの厚み減少量に及ぼす垂直距離の影響をノズル流量別を示す。いずれの曲線も厚みの減少量 Δt は垂直距離 H の二乗に反比例しているようであり、ノズル流量が大きくなると増加する傾向を示している。図中でノズル流量が大きい DNB1830 では、垂直距離が 19 および 22 cm で Δt がやや減少しているようである。この原因は、水流がプラスチック

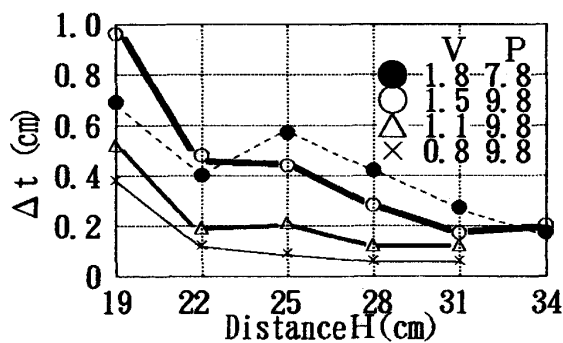


Fig. 3. Effect of distance between material and nozzle on thickness loss of plasticine.

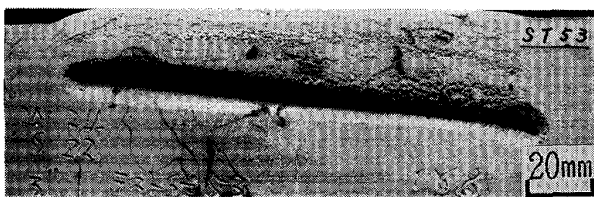


Photo. 2. Plane view of concaved profile of plasticine deformed by high pressure water from descaling nozzle ($P=9.8$ MPa, Nozzle 1530, $H=28$ cm, spraying time: 6 s).

に衝突した際、吹き飛ばされてその後面に厚く盛り上がったためと考えられる。

3.3 高圧水噴射時の衝突圧

ノズル DNB1530, 垂直距離 28 cm, 水圧力 9.8 MPa で高圧水を噴射した際の衝突力は 198 N であった。また、この条件で高圧水を 6 s 噴射後のプラスチックの凹み状況を Photo. 2 に示す。この時のプラスチックの凹み部 (幅 15.5 cm, 長さ 1.2 cm) の面積から衝突圧を計算すると、106.5 kPa となる。

4. 考 察

4.1 プラスチックの厚み減少量に及ぼす各種要因との関係

Table 2 のデータをもとに、プラスチックの厚み減少量 Δt に及ぼす寄与率の大きい 4 要因との重相関式を求め、次式が得られた。重相関係数は 78% である。

$$\Delta t = 1040PV/(vH^2) \quad (1)$$

一方、3.2 節で垂直距離の影響を調査したデータをもとに、前記の 4 要因との重相関式を求め、次式が得られた。重相関係数は 94% である。

$$\Delta t = 2000PV/(vH^2) \quad (2)$$

ここで、式 (1) および式 (2) には傾斜角の要因を取り入れるべきであるが、通常使用されている範囲ではこの

影響が小さいため、誤差の要因になっていると考えられる。また、式 (1) の重相関係数が低くなった理由として、噴射方向の影響が考えられる。すなわち、噴射方向は本来、供試材と高圧水との相対的な衝突速度の要因とみなすべきであり、噴流の流速に含まれると考えたほうがよい。このため、実験誤差が大きくなった可能性がある。

4.2 高圧水噴射時の衝突圧の計算

3.3 節で得られた衝突圧は 106.5 kPa であった。この測定条件を H. HOJAS ら⁵⁾ および (株) 共立合金製作所の技術資料¹⁰⁾ の計算式に適用して衝突圧を求めると、いづれも 107.9 kPa となり、本研究結果とよく一致する。

また、今回求めた式 (2) のプラスチックの厚み減少量は高圧水噴射時の衝突圧が大きくなるほど大きくなり、脱スケール性が良好になると考えられる。そこで、プラスチックの厚み減少量 Δt と衝突圧 p との関係を測定した結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 から、 Δt は p および $1/v$ に比例し、次式で表せることがわかった。ここで、 p が約 60 kPa 以下で Δt が減少しているが、プラスチックの剪断強さ⁸⁾ 以下になったためと考えられる。

$$\Delta t = 354.6 p/v \quad (3)$$

さらに、式 (2) および式 (3) から、次の衝突圧の実験式が得られた。

$$p = 5.64PV/H^2 \text{ (MPa)} \quad (4)$$

次に、式 (4) および H. HOJAS ら⁵⁾ の衝突圧の計算式を用いて各種噴射条件での衝突圧を計算した結果を Table 5 および Fig. 5 に示す。両式による衝突圧の計算結果はきわめてよく一致している。参考までに、H. HOJAS ら⁵⁾ の衝突圧の計算式を以下に示す。

$$p = Pt/f = 20.63 \mu F P / f \quad (5)^{5)}$$

ただし、水流量 $Q = \mu F c$ およびノズル出側における

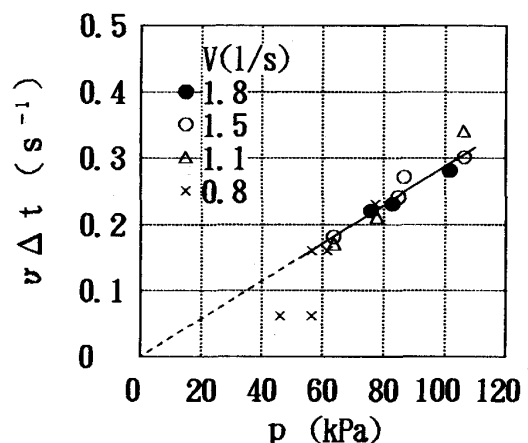
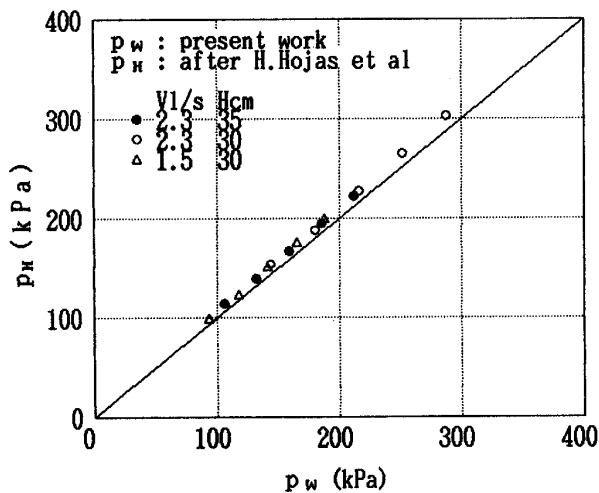


Fig. 4. Relation between impact pressure and thickness loss of plasticine.

Table 5. Calculated impact pressure at various water pressures.

Reference	Scale	V (l/s)	H (cm)	Water pressure (MPa)					Required impact pressure (kPa)
				9.8	12.3	14.7	17.2	19.6	
H. HOJAS ⁵⁾ Present work	1st	2.3	35	118 104	136 129	164 156	191 181	218 208	≥ 167
H. HOJAS ⁵⁾ Present work	1st	2.3	30	151 141	184 177	223 212	259 247	297 282	≥ 186
H. HOJAS ⁵⁾ Present work	2nd	1.5	30	97 92	121 116	148 138	173 162	196 184	≥ 59

Fig. 5. Relation between calculated impact pressure by present work and H. HOJAS *et al.*⁵⁾.

流速 $c = 4.54 \sqrt{gP/\rho}$ である。また、 μ は噴射係数 (—), F はノズルの断面積 (m^2), f は衝突面積 (m^2) および g は重力加速度 (m/s^2) である。

式(5)式は、いずれも水流量 Q またはこれに関する μ , F および f などの項目をあらかじめ測定しておく必要があるため、実用にはやや不便である。

したがって、式(4)は、水圧力 P , ノズル流量 V および垂直距離 H の3要因から衝突圧を求めることができる簡便式であり、式(5)に比べて実用的である。

4.3 高圧水噴射時の衝突圧と脱スケール性の検討

高圧水による脱スケールの適正条件を推定するには、①高温鋼材の脱スケール性を高め、かつ、②鋼材の温度低下を小さくすることが重要である。ここでは①のみを検討し、次報¹¹⁾で総合的に検討する。

先に、水圧力 9.8 MPa, ノズル DNB1530 および垂直距離 28 cm での衝突圧は 106.5 kPa であると報告した。また、今回、著者らが低炭素鋼の二次スケールの脱スケールに必要な最低衝突圧を調査したところ、35 kPa が得られた。

この値は、O. HENNIG ら⁷⁾ が求めた普通鋼および低合金鋼の熱間圧延における二次スケールの脱スケールに必

要な衝突圧の約 50~80 kPa に近い、したがって、この衝突圧は、低炭素鋼の二次スケールの脱スケールに対しては十分な値と考えられる。

一方、W. HEROLD⁶⁾ は、鋼種が不明であるが、熱延鋼板および条鋼材での二次スケールの脱スケールに必要な衝突圧を求め、200~400 kPa を推奨している。この報告での最低衝突圧は著者らの値に比べて約 1 桁高い。この理由は、脱スケールが難しい条鋼材での衝突圧を目安にしているためと考えられる。この衝突圧を得るには、前記の高圧水噴射条件では不十分で、ノズルに DNB1530 を使用し、水圧力 P を 14.7 MPa に増加した場合、垂直距離 H は約 18 cm 以下にする必要がある。

次に、一次スケールについては、H. HOJAS ら⁵⁾ は普通鋼、低および高合金鋼においては最低約 400 kPa の衝突圧が必要であるとしている。また、W. HEROLD⁶⁾ は 400~2000 kPa および O. HENNIG ら⁷⁾ は 200~250 kPa 以上の衝突圧を推奨している。この値は二次スケールの脱スケールに必要な衝突圧の約 2~5 倍も高い。

この理由は、一次スケールはきわめて厚いため、二次スケールに比べて高圧水によるスケールと地鉄の界面の急冷作用が起りにくいこと、ヴスタイト (FeO) は高温ほど塑性変形しやすい¹²⁾ ことおよび合金鋼では加熱中に生成したサブスケールの投錨作用により剥離しにくくなっていることなどが考えられる。

以上を Table 6 に要約して示す。これから、一次スケールを除去するために必要な衝突圧は、12% Cr 鋼のような高合金鋼の場合には約 400 kPa 以上、普通鋼および低合金鋼の場合には約 250 kPa 以上と考えられる。

そこで、この衝突圧を得るための条件を検討する。たとえば、式(4)の水圧力 P を 14.7 MPa およびノズル流量 V を 2.3 l/s として、400 kPa 以上の衝突圧を得るには、垂直距離を 22 cm 以下および 250 kPa 以上の衝突圧を得るには、垂直距離を 28 cm 以下にする必要がある。

以上述べたように、とくに、一次スケールの脱スケールに必要な衝突圧は、二次スケールに比べてきわめて高

Table 6. Impact force and pressure by hydraulic descaling.

Reference Scale	Present work (kPa)	O. HENNIG <i>et al.</i> ⁷⁾ (kPa)	H. HOJAS <i>et al.</i> ⁵⁾ (kPa)	W. HEROLD ⁶⁾ (kPa)
1st 2nd	— 35	196~245 49~78	410 —	392~1960 196~392
Steel used	Low carbon steels	Carbon steels Low alloy steels	Carbon steels High alloy steels	Hot rolled steel sheets Bar steels

Table 7. Some examples of impact pressure by hydraulic descaling on hot strip mills¹³⁾.

Condition		A	B	C
RSB	<i>P</i> (MPa)	14.7	14.7	12.7
	<i>V</i> (l/s)	1.2	1.5	1.5
	<i>H</i> (mm)	690, 300	613, 348	470, 220
	<i>p</i> (kPa)	20, 104	40, 124	59, 268
FSB	<i>P</i> (MPa)	14.7	14.7	14.7
	<i>V</i> (l/s)	0.9	1.5	1.5
	<i>H</i> (mm)	275, 165	285, 225	190, 190
	<i>p</i> (kPa)	92, 257	183, 295	414, 414

いので、鋼種および目的に応じて必要な衝突圧を確保する適正脱スケール条件を選定することが肝要である。

4.4 熱間圧延ラインの脱スケール設備の衝突圧

次に、わが国の熱間圧延ラインにおける脱スケール設備¹³⁾の衝突圧を検討する。ここで使用されている脱スケール条件は、水圧力が14.7 MPa、ノズルがDNB0825~2325 および垂直距離が約20~60 cm のものが比較的に多い。これらの衝突圧を式(4)から求めた結果をTable 7に示す。

これから、現状の熱間圧延ラインにおける一次スケールの脱スケール設備での衝突圧は約20~270 kPaで、とくに、上面側でやや低い。この値は、H. HENNIG ら⁷⁾の低炭素鋼および低合金鋼の場合に必要な衝突圧の200~250 kPa に比べてもやや低くなっている。

この理由として、垂直距離の中に鋼材の厚みが含まれているものがあること、縦ロール(VSB)による一次スケールの破壊作用が加味されていないことおよび完全には脱スケールされない場合も圧延によるスティッキングおよびその後の脱スケールで除去されることなどが考えられる。

一方、二次スケールの場合の衝突圧は約30~400 kPaで、H. HENNIG ら⁷⁾の50~80 kPa に比べてやや高く、とくに、仕上げ圧延機入り側(FSB)での衝突圧は約100~400 kPa と高い。この理由は、FSBでの脱スケールは鋼板の表面品質への影響が大きいので、脱スケール性を高めることに主眼をおいているためと考えられる。しかし、衝突圧を高くするとともに鋼材の温度低下も大きくなると考えられるので、脱スケール性を確保し、かつ、鋼材の温度低下を抑制するための適正脱スケール条

件を選定することが必要である。

5. 結 言

高压水を噴射時の衝突圧に及ぼす要因について、実験計画法によるプラスティシンの実験と面圧計を用いて実験を行い、以下の結果を得た。

(1) 高压水を噴射時のプラスティシンの厚み減少量 Δt はノズル流量 V 、水圧力 P 、通板速度 v および垂直距離 H の4要因と相関関係が強い。

(2) 高压水によるプラスティシンの厚み減少量 Δt および衝突圧 p は各要因と次の実験式が成り立つ。

$$\Delta t = 2000 PV / (v H^2) \text{ (cm)}$$

(重相関係数 94%)

$$p = 5.64 PV / H^2 \text{ (MPa)}$$

上記衝突圧の式は、簡便かつ、実用的であり、H. HOJAS らの式で求めた結果とよく一致する。

上記の結果から、現状の熱間圧延工程における脱スケール条件を考察したところ、下記の検討、最適化が必要であることが判明した。

① 一次スケールを除去するために必要な衝突圧は、二次スケールに比べてきわめて高いので、その脱スケール条件を設定する時には十分検討する必要がある。

② 現状の熱延ラインでの衝突圧は、とくにFSBでの衝突圧が高くなっている。そのため、脱スケールによる鋼材の温度低下を抑制するための適正脱スケール条件の検討が必要である。

最後に、本研究にあたって適切な御助言をいただいた近畿大学理工学部教授合田進博士、新日本製鉄(株)第二技術研究所薄板研究センター所長加藤弘博士および主幹研究員秋末治博士に深く感謝いたします。

文 献

- 1) R. E. TYLECOTE: J. Iron Steel Inst., **195** (1960), p. 380
- 2) N. B. PHILLING and R. E. BEDWORTH: J. Inst. Met., **29** (1923), p. 529
- 3) 松野二三郎: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 599
- 4) T. SHEPPARD and W. M. STEEN: J. Iron Steel Inst., **208** (1970), p. 797
- 5) H. HOJAS and R. RHEINDT: Berg. Hüttenmann Monatsh., **112** (1967), p. 372
- 6) W. HEROLD: Bänder Bleche Rohre (1969), p. 279

-
- 7) O. HENNIG and G. ZWANZIG: *Neue Hütte*, **9** (1964), p. 361
 - 8) 柳下小太郎, 塚本顯彦, 江川康夫, 大森舜二, 飯伏順一:
三菱重工技報, **11** (1974), p. 43
 - 9) 田口玄一: 実験計画法上 (1975), p. 104 [丸善]
 - 10) デスケーリングノズル高圧試験報告書 (共立合金製作所
編) (1989 年 10 月)
 - 11) 和田忠義, 押見正一, 上田正雄: 鉄と鋼, **77** (1991),
p. 1458
 - 12) 松野二三朗, 錦田俊一: 鉄と鋼, **71** (1985), S1282
 - 13) わが国における最近のホットストリップ製造技術 (日本
鉄鋼協会編) (1987), p. 396
-